

اللدائن والمواد المركبة



تأليف

الدكتور عبداللطيف رشاد السامرائي

الطبعة الأولى 2010

لا يُسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات أو نقله أو استنساخه بأي شكل من الأشكال دون إذن خطي مسبق من المؤلف.

الطبعة الأولى

2010 إفرنجي

تصميم الغلاف: د. عبداللطيف رشاد السامرائي

 المراسلات

توجه جميع المراسلات باسم المؤلف الى البريد الاليكتروني:

latifrashad@yahoo.com

الإهداء

إلى زوجتي والى أولادي هدير وشيرين ومصطفى
وجمانة والمهدي وأحمد

المؤلف

الشكر والتقدير

الحمد لله حمداً يوافي نعمه.... ويليق بجلال وجهه الكريم وعظيم سلطانه
فهو ولي كل التوفيق وملهم كل خيرالهادي الى الحق.... وبعد
فانه لا يسعني إلا أن أتقدم بخالص الشكر والتقدير والعرفان الى كل من ساهم معنا
ومد لنا يد العون كي يظهر هذا الكتاب الى حيز الوجود ونخص الذكر الأستاذ:
ناظم حمود عبيد والأستاذ: **محمد أحمد البوسيفي** لملاحظاتهم ومساعداتهم
القيمة.....

مقدمة

في مطلع القرن العشرين، بدأت تبرز إلى حيز الوجود مواد جديدة من صنع الإنسان، اكتشفت لها استعمالات جعلتها تنافس المواد الطبيعية. ومن أهم هذه المواد هي اللدائن (البلاستيك) والمواد المركبة، فقد أصبحت صناعة هذه المواد من أهم الصناعات إلى حد يمكن تسمية العصر الحاضر بعصر اللدائن والمواد المركبة.

اللدائن هي مواد يمكن تشكيلها بسهولة، وأصلها مركبات كيميائية يتم الحصول على معظمها من النفط. تتألف اللدائن من مركبات ذات سلاسل طويلة تسمى بالبوليمرات، وهي مرتبة بنسق معين وهذا الترتيب يعطي اللدائن مزايا متعددة. يمكن لللدائن الصلبة ان تحل محل المعادن في الكثير من التطبيقات، أما اللدائن الطرية فتدخل في صناعة الخيوط والجلود وحتى الفرو.

في عام 1862م صنع الكيميائي ألكسندر باركس (Alexander Parkes) أول نوع من اللدائن من مادة نترات السليلوز وهي مادة طبيعية. شاهد الناس ذلك في معرض لندن ثم طور هذا الشكل على يد الأمريكي جون وبسلي، الذي سماها بالسليليويد فيما بعد. ومع أن بوليمر السليليويد كان هشاً ويتغير لونه عند تعرضه للضوء الشديد، إلا انه استعمل في صناعة كرات البليارد والأسنان الاصطناعية والأفلام الفوتوغرافية.

إن أول شكل كيميائي لللدائن من مكونات كيميائية تم صنعه في عام 1909 م وكان يسمى بالبلاكلايت. ظهرت بعد ذلك أنواع أخرى مثل (البولي يستر) و(البي في سي) اللذين يمتلكان خفة الوزن والمرونة وإمكانية التلوين ويتحملان الرطوبة والحرارة الشديدة.

ان غالبية الأجهزة والآلات التي تُستخدم في يومنا هذا، يدخل في صنعها نوع من أنواع اللدائن. فاللدائن ميدان جديد من ميادين الصناعات الحديثة، وفيه متسع كبير لإشباع رغبات الكثيرين، سواء كان ذلك للهواية أو للصناعة. لقد أمكن استخدام اللدائن المختلفة ذات الألوان الزاهية في صناعة العديد من الأدوات اللازمة للاستخدام اليومي في المكتب والمنزل والكثير من الأعمال اليدوية. وبعد أن غزت اللدائن حياتنا اليومية، أصبح من الضروري في يومنا هذا ان نبحث عن حلول جديّة لمشاكل إعادة التصنيع لهذه المادة للحد من تلويثها للبيئة.

أن التقدم التقني والتطور قد دفع بالحاجة الى مواد هندسية جديدة ذات خواص فريدة وقد أدى ذلك الى ظهور مواد يطلق عليها المواد المركبة (Composite Material). أنه مصطلح يطلق على المواد التي تتألف من نوعين مختلفين أو أكثر من المواد، وتكون مترابطة معاً بشكل موحد بحيث تحيط إحدهما وتعرف بالمادة الأساس بالمادة الأخرى والتي تعرف بالمادة المقوية

وتكون الأخيرة بشكل ألياف أو دقائق أو شعيرات أو رقائق. ويشترط في المواد المقوية ان تكون لها القدرة على الالتصاق بالمادة الأساس وان لا يحدث أي تفاعل كيميائي بينهما على السطوح البينية مع توفر خصائص سطحية جيدة للتقوية. وتمتاز هذه المواد بتألف مجموعة من الخواص لا يمكن لا يمكن الحصول عليها مجتمعة في أي من مكوناتها الأساسية المنفردة مثل الجساءة العالية ومقاومة التآكل العالية، والمقاومة الميكانيكية ومعامل المرونة العاليتين والصلادة وانخفاض الوزن.

لم يكن اكتشاف هذه المادة حديثاً، فقد أستعمل السومريون والمصريين القدماء المواد المركبة في البناء عن طريق خلط الطين بالتبن. ولقد تطورت الآن و حالياً لا يخلو أي مكان من المواد المركبة، بدأً من الأثاث المنزلي ومروراً بالجران التي تتكون من الأسمنت والرمل وانتهاءً في ماص الصدمات في هيكل السيارة وهو خليط من ألياف صناعية وعجينة من اللدائن، بالإضافة إلى تطبيقات كثيرة.

يوفر هذا الكتاب معلومات مفيدة ومبسطة عن تقنيات تصنيع اللدائن والمواد المركبة بالإضافة الى استعراض أهم التطبيقات الأساسية لهذه المواد التي أصبحت مثار اهتمام العلماء والمصنعين نظراً لما تمتلك من مميزات جعلها تتفوق على الكثير من المواد الهندسية. ونظراً لافتقار وقلة هذا النوع من المصادر في مكتباتنا العربية فقد كان هذا دافعاً مهماً لي لإنجاز مثل هذا العمل المتواضع، والله ولي التوفيق.

المؤلف

المحتويات

الفصل الأول: المواد المتبلّمة

(1)	المقدمة	1-1
(3)	المواد اللدائنية	2-1
(4)	المواد الخام	3-1
(5)	جزيئات البوليمر	4-1
(7)	كيف تُصنّع جزيئات البوليمر	5-1
(9)	أوضاع الترابط على المير (الوظيفية)	6-1
(10)	البلمرة	7-1
(11)	البلمرة بالتكثيف	1-7-1
(12)	البلمرة بالإضافة	2-7-1
(14)	مقارنة بين البلمرة بالإضافة والبلمرة بالتكثيف	8-1
(14)	الوزن الجزيئي	9-1
(20)	أشكال وأسلوب بناء جزيئات البوليمر	10-1
(24)	أنواع البوليمرات	11-1
(28)	أشكال جزيئات البوليمر	12-1
(28)	الجزيئات المتناظرة	1-12-1
(30)	الجزيئات غير المتناظرة	2-12-1
(32)	معالجة تصليد البوليمرات (الفلكنة)	13-1
(34)	قوى التجاذب في بوليمرات الثرموبلاستيك	14-1
(35)	القطبية المؤقتة	1-14-1
(35)	القطبية الدائمة	2-14-1
(37)	التبلور في المواد المتبلّمة	15-1
(39)	البوليمرات الموجّهة	16-1
(40)	درجات حرارة التحول	17-1
(42)	خواص البوليمرات عند درجة الحرارة المحيطة	18-1
(48)	اختبار الشد لللدائن	19-1

(50)	السلوك الميكانيكي للبوليمرات	20-1
(52)	تأثير الزمن ودرجة الحرارة	21-1
(59)	إعداد المبلمرات للاستعمال	22-1
(65)	ميكانيكيات التقوية في اللدائن	23-1
73	أسئلة الفصل	

الفصل الثاني: تقنيات تشكيل اللدائن

(76)	مقدمة	1-2
(76)	القولبة بالكبس	2-2
(80)	القولبة الانتقالية	3-2
(82)	القولبة بالحقن	4-2
(85)	السياكة	5-2
(87)	القولبة بالبتق	6-2
(91)	القولبة الدوارة	7-2
(93)	القولبة بالنفخ	8-2
(94)	قولبة النفخ بالبتق	1-8-2
(99)	قولبة النفخ بالحقن	2-8-2
(100)	قولبة النفخ بالمط (الشد)	3-8-2
(100)	تشكيل الأفلام و الصفائح	9-2
(104)	التشكيل الحراري	10-2
(104)	التشكيل الحراري الفراغي	1-10-2
(105)	التشكيل الحراري بالضغط	2-10-2
(106)	التشكيل الحراري الميكانيكي	3-10-2
(108)	عمليات تشكيل المطاط	11-2
(111)	تشغيل اللدائن	12-2
(113)	المنتجات اللدائنية الخاصة	13-2
(120)	أسئلة الفصل	

الفصل الثالث: تصميم قوالب المنتجات اللدائنية

(121)	قوالب اللدائن	1-3
(123)	الوظائف الأساسية للقالب	2-3
(123)	تشكيل المنتج	1-2-3
(124)	نقل المادة اللدائنية من الآلة إلى فجوة القالب	2-2-3
(124)	إزالة الهواء المحصور من الفجوة أثناء التعبئة	2-2-3
(125)	تبريد اللدائن	4-2-3
(125)	قذف المنتج	5-2-3
(126)	تصميم الأجزاء البلاستيكية المقولبة	3-3
(132)	متطلبات تصنيع القالب	4-3
(132)	الدقة	1-4-3
(132)	الأنهاء السطحي (التشطيب)	2-4-3
(134)	الإنتاجية	3-4-3
(140)	المقاومة الفيزيائية للقالب	4-4-3
(142)	السلامة الصناعية	5-4-3
(143)	صيانة القالب	6-4-3
(144)	تقدير كلفة القالب	7-4-3
(145)	مادة القالب	5-3
(145)	الصلب الكربوني	1-5-3
(148)	المواد المسبوكة	2-5-3
(148)	مواد معدنية غير حديدية	3-5-3
(150)	قوالب القولبة بالحقن	6-3
(153)	أنواع القوالب الأخرى	7-3
(156)	أسئلة الفصل	
الفصل الرابع: أنظمة المبلمرات		
(157)	مقدمة	1-4
(157)	اللدائن الحرارية (الثرموبلاستيك)	2-4
(157)	البوليمرات الأثينية	1-2-4

(169)	أسيئات السليلوز	2-2-4
(170)	زيدات أسيئات السليلوز	3-2-4
(170)	ميثا أكريلات البولي مثيل	4-2-4
(172)	البولي أميد (النايلون)	5-2-4
(173)	البولي أسيثال	6-2-4
(174)	السليلوز	7-2-4
(175)	البولي يستير	8-2-4
(177)	البولي كربونيت	9-2-4
(177)	الأكريلونتريل بوتادين ستيرين	10-2-4
(179)	اللدائن المتصلبة حرارياً (الثرموستنك)	3-4
(179)	الأبيوكسيادات	1-3-4
(180)	البولي إمايد	2-3-4
(181)	الفينولات	3-3-4
(183)	البولي يورثين	4-3-4
(185)	السليكونات	5-3-4
(186)	الميلامين فورمالديهايد واليوريا فورمالديهايد	6-3-4
(187)	الإلاستومرات	7-3-4
(196)	أسئلة الفصل	
الفصل الخامس: البوليمرات المستخدمة في المكونات الإنشائية		
(197)	مقدمة	1-5
(199)	أنواع البوليمرات المستخدمة في المكونات الإنشائية	2-5
(203)	معامل التمدد الحراري	1-2-5
(205)	الصلببية أو الجساءة	2-2-5
(207)	درجة الحرارة	3-2-5
(208)	الزحف	4-2-5
(211)	سرعة تكوين اللهب	5-2-5

(212)	متانة الثلم	6-2-5
(214)	الكلال	7-2-5
(215)	تباين الخواص باختلاف المحاور	8-2-5
(216)	إمتصاص الرطوبة	9-2-5
(218)	أسئلة الفصل	
الفصل السادس: التطبيقات الميكانيكية للبوليمرات		
(219)	الخواص الميكانيكية	1-6
(223)	استخدام البوليمرات في تطبيقات الاحتكاك والبلى	2-6
(225)	قياس البلى في	3-6
(230)	الخصائص الاحتكاكية	4-6
(232)	استخدام البوليمرات في المحامل البسيطة	5-6
(238)	التطبيقات العامة للبلى	6-6
(244)	أسئلة الفصل	
الفصل السابع: تطبيقات الطلاء بالبوليمرات		
(244)	الطلاء البوليمري	1-7
(245)	تكوين الفلم	2-7
(247)	خصائص الطلاء	3-7
(254)	إعداد السطوح للطلاء	4-7
(255)	تطبيق الطلاء	5-7
(256)	اختيار الطلاء المناسب	6-7
(263)	أسئلة الفصل	
الفصل الثامن: استخدامات البوليمرات كمواد لاصقة		
(264)	الاصقوية	1-8
(265)	تصنيف البوليمرات اللاصقة	2-8
(267)	ميكانيكيات الالتصاق	3-8
(267)	صلابة الرابطة	1-3-8

(269)	اختيار اللاصق	2-3-8
(275)	تطبيقات اللواصق	4-8
(277)	أسئلة الفصل	
الفصل التاسع: تقنيات لحام اللدائن		
(277)	مقدمة	1-9
(278)	وصلات ربط اللدائن	2-9
(279)	أساسيات لحام اللدائن	3-9
(280)	تصميم وصلات لحام اللدائن	1-3-9
(280)	اللحام بالغاز الساخن	4-9
(282)	لحام الغاز الساخن يدوياً	1-4-9
(283)	لحام الغاز الساخن ذو السرعة العالية والشبه المؤتمت	2-4-9
(285)	اللحام بالعدة الساخنة	5-9
(286)	اللحام بالصفحة الساخنة	1-5-9
(286)	مميزات وعيوب تقنية اللحام بالعدة الساخنة	2-5-9
(288)	تطبيقات تقنية اللحام بالعدة الساخنة	3-5-9
(288)	اللحام بالموجات فوق الصوتية	6-9
(290)	مميزات وعيوب تقنية اللحام بالموجات فوق الصوتية	1-6-9
(290)	تطبيقات اللحام بالموجات فوق الصوتية	2-6-9
(291)	اللحام التدويمي	7-9
(292)	مميزات وعيوب تقنية اللحام التدويمي	1-7-9
(293)	متطلبات التصميم لوصلات اللحام التدويمي	2-7-9
(293)	اللحام الاهتزازي	8-9
(294)	إعتبرات التصميم الرئيسية	1-8-9
(296)	مميزات وعيوب تقنية اللحام الاهتزازي	2-8-9
(296)	اللحام الأليكترومغناطيسي	9-9
(299)	اللحام بالليزر	10-9
(301)	أسئلة الفصل	

الفصل العاشر: اللدائن والبيئة

(303)	مقدمة	1-10
(306)	الحوافز لمعالجة النفايات اللدائنية	2-10
(306)	أنواع مخلفات الراتنجات اللدائنية	3-10
(308)	تجميع المخلفات اللدائنية	4-10
(308)	طرائق معالجة المخلفات اللدائنية	5-10
(309)	تقليص الحجم	1-5-10
(309)	التدوير	2-5-10
(311)	إعادة الاستخدام	3-5-10
(313)	اللدائن المتحللة	4-5-10
(314)	حرقها وتحويلها إلى طاقة	5-5-10
(315)	الردم	6-5-10
(315)	التدوير الكيماوي	7-5-10
(317)	أسئلة الفصل	

الفصل الحادي عشر: المواد المركبة

(319)	مقدمة	1-11
(321)	مميزات المواد المركبة ودورها في الصناعة	2-11
(321)	عيوب المواد المركبة	3-11
(322)	أصناف المواد المركبة	4-11
(322)	الطور الأساسي	1-4-11
(324)	الطور المنتشر (المُعَوَى)	2-4-11
(324)	الطور البيئي في المواد المركبة	3-4-11
(326)	تصنيف المواد المركبة I (بالاعتماد على المادة الأساس)	5-11
(326)	المواد المركبة المعدنية	1-5-11
(327)	المواد المركبة السيراميكية	2-5-11
(327)	المواد المركبة اللدائنية	3-5-11

(328)	تصنيف المواد المركبة II (بالاعتماد على البنية الهيكلية لمادة التقوية)	6-11
(328)	المواد المركبة المقواة بالدقائق	1-6-11
(330)	المواد المركبة المقواة بالألياف	2-6-11
(331)	المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة	1-2-6-11
(331)	المواد المركبة المقواة بالألياف الطويلة	2-2-6-11
(331)	المواد المركبة الطبقية	3-6-11
(333)	البنية الهيكلية للمواد المركبة	7-11
(333)	الرابطة البينية	1-7-11
(334)	شكل واتجاه الطور المنتشر	2-7-11
(334)	المواد المركبة المقواة بالدقائق	1-2-7-11
(335)	المواد المركبة المقواة بالألياف	2-2-7-11
(336)	المواد المركبة الطبقية	3-2-7-11
(337)	أسئلة الفصل	
الفصل الثاني عشر: تخمين خواص المواد المركبة		
(338)	مقدمة	1-12
(338)	تخمين خواص المواد المركبة	2-12
(339)	قانون الخلط	3-12
(339)	المواد المركبة المقواة بالدقائق	4-12
(340)	المواد المركبة المقواة بالدقائق الكبيرة	1-4-12
(344)	المواد المركبة المقواة بالتشيت	2-4-12
(345)	المواد المركبة المقواة بالألياف	5-12
(346)	تأثير طول الليفة	1-5-12
(348)	تأثير اتجاهات و تركيز الألياف	2-5-12
(349)	الألياف المستمرة والمصطفة في المواد المركبة	3-5-12
(349)	سلوك أجهاد الشد-الانفعال بالاتجاه الطولي للتحميل	1-3-5-12
(351)	السلوك المرن - التحميل الطولي	2-3-5-12

(357)	السلوك المرن - التحميل المحاذي	3-3-5-12
(359)	صلابة الشد في الاتجاه الطولي	4-3-5-12
(360)	صلابة الشد بالاتجاه المحاذي	5-3-5-12
(362)	المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة العشوائية الاتجاهات	6-3-5-12
(364)	معامل التمدد الحراري في الاتجاه الطولي (موازياً لإصطفاف الألياف)	7-3-5-12
(364)	معامل التمدد الحراري في الاتجاه المحاذي (عمودياً على إصطفاف الألياف)	8-3-5-12
(365)	معامل الجساءة	9-3-5-12
(365)	نسبة بويسون	10-3-5-12
(366)	أسئلة الفصل	
الفصل الثالث عشر: المواد المركبة المعدنية		
(371)	مقدمة	1-13
(374)	المواد المركبة المعدنية التي أساسها الألمنيوم	2-13
(374)	خواص المواد المركبة التي أساسها الألمنيوم	1-2-13
(375)	المواد المركبة المعدنية التي أساسها المغنيسيوم	3-13
(375)	المواد المركبة المعدنية التي أساسها التيتانيوم	4-13
(376)	خواص المواد المركبة التي أساسها التيتانيوم	1-4-13
(376)	المواد المركبة المعدنية التي أساسها النحاس	5-13
(377)	طرائق تصنيع المواد المركبة المعدنية	6-13
(377)	طريقة الحالة السائلة	1-6-13
(378)	السباكة بالخلط	1-1-6-13
(378)	الترشيح	2-1-6-13
(380)	الترشيح بضغط الغاز	3-1-6-13
(383)	الترشيح بالسباكة بالعصر	4-1-6-13
(384)	الترشيح بقوالب الضغط	5-1-6-13
(385)	طريقة الحالة الصلبة	2-6-13

(386)	الترابط بالانتشار	1-2-6-13
(387)	التلييد	2-2-6-13
(388)	طريقة الكبس الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية.	7-13
(389)	طريقة الكبس الأيزوستاتيكي الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية	1-7-13
(390)	طريقة بثقب المسحوق الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية	2-7-13
(391)	طريقة التصنيع في الموقع الأصلي لتصنيع المواد المركبة المعدنية	3-7-13
(394)	فوائد طريقة الموقع الأصلي للمواد المركبة المعدنية	1-3-7-13
(394)	عيوب طريقة الموقع الأصلي	2-3-7-13
(394)	التجمد الموحد الاتجاه للسبائك اليوتكتيكية	8-13
(396)	أسئلة الفصل	
الفصل الرابع عشر: المواد المركبة اللدائنية		
(398)	مقدمة	1-14
(400)	المواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الزجاجية	2-14
(404)	المواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الكربونية	3-14
(408)	الألياف الكربونية المصنعة من البولي أكريلونايترايل	1-3-14
(408)	الألياف الكربونية المصنعة من القطران	2-3-14
(410)	المواد المركبة اللدائنية المقواة بألياف الأراميد	4-14
(411)	ألياف كيفلير المقوية لللدائن	1-4-14
(416)	الألياف الأخرى المستخدمة في تقوية اللدائن	5-14
(417)	الأطوار الأساسية اللدائنية في المواد المركبة اللدائنية	6-14
(418)	تقنيات تصنيع المواد المركبة اللدائنية وتتضمن هذه الطرائق الأكثر استخداماً	7-14
(418)	طريقة القالب المفتوح	1-7-14
(420)	التكديس اليدوي	1-1-7-14
(421)	الترذيد	2-1-7-14

(422)	التكديس الشريطي	3-1-7-14
(423)	الإنضاج المحمي المؤصد (الأوتوكلاف)	4-1-7-14
(424)	اللف الخيطي	5-1-7-14
(426)	طريقة القالب المغلق	2-7-14
(427)	القولبة الانضغاطية	1-2-7-14
(428)	القولبة بالحقن	2-2-7-14
(430)	القولبة الانتقالية	3-2-7-14
(432)	المواد المركبة الهجينة	8-14
(434)	أسئلة الفصل	

الفصل الخامس عشر: المواد المركبة السيراميكية

(435)	مقدمة	1-15
(437)	الخواص الشائعة للمواد المركبة السيراميكية	2-15
(437)	المواد المركبة السيراميكية التي أساسها كربيد السليكون	3-15
(438)	المواد المركبة السيراميكية التي أساسها الألومينا والألومينا-سيليك (المولايت)	4-15
(438)	المواد المركبة السيراميكية التي أساسها الكربون والمقواة بالكربون	5-15
(438)	تصنيع المواد المركبة السيراميكية بطريقة الترشيح البخاري الكيميائي	6-15
(441)	تصنيع المواد المركبة السيراميكية الأساس بطريقة الترشيح بالطور السائل	7-15
(441)	ترشيح السيراميك المنصهر	1-7-15
(441)	طريقة الترشيح الملاطي	2-7-15
(442)	طريقة الترشيح بالمنصهر المفاعل	3-7-15
(443)	الترشيح والتحلل الحراري للبوليمر	4-7-15
(444)	تصنيع المواد المركبة السيراميكية بطريقة الصل (المحلول الغرواني)-الهلام	8-15

(445)	تصنيع مكونات المواد المركبة السيراميكية بطريقة الأكسدة المباشرة	9-15
(447)	المواد المركبة كربون - كربون	10-15
(448)	البنية الهيكلية للمواد المركبة كربون - كربون	1-10-15
(448)	تصنيع المواد المركبة كربون - كربون بطريقة الترشيح بالطور السائل	2-10-15
(449)	تصنيع المواد المركبة كربون - كربون بطريقة ترسيب البخار كيميائياً	3-10-15
(450)	خواص المواد المركبة كربون - كربون	4-10-15
(451)	الحماية من التأكسد للمواد المركبة كربون - كربون	5-10-15
(451)	استخدامات المواد المركبة كربون - كربون	6-10-15
(452)	اكتساب المتانة بالتحويلات الطورية	11-15
(454)	المواد المركبة السيراميكية المقواة بالشعيرات	12-15
(456)	أسئلة الفصل	
الفصل السادس عشر: المواد المركبة الهيكلية		
(457)	مقدمة	1-16
(457)	المواد المركبة الطبقية	2-16
(459)	الألواح الساندويتشية	3-16
(461)	كيف تعمل الألواح الساندويتشية المركبة	1-3-16
(463)	عمليات تصنيع اللدائن الطبقي	4-16
(464)	التغميس	1-4-16
(466)	القولبة الطبقية بالحقن	2-4-16
(468)	طريقة الإنتاج بالتشريب المسبق براتنج لدائني	3-4-16
(471)	أسئلة الفصل	
(472)	الملاحق	
(495)	المصادر	

الفصل الأول

المواد اللدائنية (المتبلمرة)

POLYMERIC MATERIALS

1-1 المقدمة

لقد استخدمت اللداائن الموجودة طبيعياً والمستخرجة من النباتات والحيوانات لقرون عديدة، وقد تضمنت هذه المواد الخشب، المطاط، القطن، الصوف، الجلد، والحريز. ان الأنواع الأخرى للداائن الطبيعية كالبروتين والإنزيمات والنشا والسليولوز، كانت مهمة في العمليات الحيوية والفسلجية للنباتات والحيوانات. لقد أدت تقنيات البحث العلمي الحديثة إلى إيجاد البنية الجزيئية لهذه المجموع من المواد وتطوير العديد من اللداائن، حيث تم تصنيعها من جزيئات عضوية صغيرة. ان العديد من اللداائن المفيدة كالمطاط والألياف هي لداائن مُصنعة (لداائن اصطناعية). إن تأريخ اكتشاف اللداائن (المواد المتبلمرة) كان قد بدأ في عام 1833 م عندما تم اكتشاف المطاط الصلب من قبل تشارلز كودبير، تبعته التطورات التي أجريت على السليوليد (Celluloid) (مادة لدائنية مصنوعة بصورة أساسية من السليولوز) من قبل العالم جون ويزلي في عام 1886 م. في عام 1909 م قام علماء كيميائيين من بلجيكا و أمريكا، بمزج الفينول و الفورمالدهايد و حصلوا على مادة صناعية سميت بالبكلايت (Bakelite).

ان اللداائن أو البلاستيك هو الاسم الشائع للبوليمرات: وهي مواد اصطناعية كبيرة الوزن الجزيئي و تصنع من سلاسل طويلة تتألف من الكربون و عناصر أخرى. كل وحدة في السلسلة يطلق عليها بالمونومير، وهي مواد كيميائية يتم إنتاجها من النفط الخام والغازات التي أساسها الكربون. فاللداائن غالباً ما تُسمى بالراتنج (Resin) عندما تكون كمادة أولية قبل التشكيل، و هي المادة الشائعة في عمليات التصنيع الحديثة. ان المصطلح لداائن يشير عادةً إلى المواد العضوية الإصطناعية المصنوعة من مواد كيميائية والتي تُسمى بالمونوميرات. المونومير (كالثيلين) يتفاعل مع جزيء مونومير آخر مكوناً سلسلة طويلة من مجاميع متكررة مكونة للبوليمر (كالبولي أثيلين). يستعمل المصطلح بوليمر في بعض الأحيان (تعني كلمة بولي في اللغة اليونانية عديد، ومير تعني الأجزاء) للإشارة إلى المادة التي تتألف من العديد أو الكثير من آلاف الجزيئات التي

ترتبط ببعضها البعض مكوناً جزيئاً معقداً وكبيراً. ان مثل هذه السلاسل الطويلة للجزيئات تتألف من ذرات عناصر الأوكسجين، الهيدروجين، النيتروجين، الكربون، السيلكون، الفلور، و الكبريت. يبدأ تكوين اللدائن من الغاز (المونومير)، ثم يتحول إلى الحالة السائلة، ثم يتم تشكيلها بواسطة الحرارة أو بالحرارة و الضغط حتى تصبح في الحالة الصلبة في شكلها النهائي. ان إضافة مواد أخرى لتقوية اللدائن سينتج عنها صنف جديد من المواد تسمى بالمواد المركبة. هنالك أنواع كثيرة من اللدائن حيث إنها تعتمد على نوع المونومير المختار، طول سلاسل البوليمر، و نوع المركب المعد للإضافة و قد تم تطوير كل نوع من اجل أغراضاً خاصة. يتم إضافة مواد أخرى لللدائن أثناء عملية التصنيع، كالصبغات لإكسابه اللون، المذيبات، المزيئات، الملدنات، والحشوات، والغرض منها هو لتقليل كلفة التصنيع ولتقليل الانكماش ولتحسين المقاومة الحرارية وإكسابه المقاومة ضد الصدمات، أو لتعزيز الخواص الأخرى المرغوبة للمنتج.

2-1 المواد اللدائنية (Polymeric Materials)

ان اللدائن مادة صناعية (Synthetic) كبيرة الوزن الجزيئي و تتألف غالبيتها من وحدات كيميائية عضوية متكررة، فهنالك أنواعاً كثيرة من عائلات اللدائن، وتتوفر بأصناف عديدة لكي تناسب مختلف متطلبات الإنتاج. لا توجد مادة لدائنية واحدة في الطبيعة تستطيع أن تغطي بالكامل كل المتطلبات، لذلك فان المفاضلة بينهم في الغالب ستكون ضرورية. فلكل عائلة هنالك خواص معينة وتطبيقات و تقنيات تصنيع مختلفة، وتختلف الخواص حتى في نفس العائلة الواحدة. فعلى سبيل المثال، هنالك أكثر من 400 نوع مختلف من البولي أثيلين، كل نوع يختلف قليلاً عن الأنواع الأخرى. ان هذا الاختلاف بين أعضاء العائلة الواحدة لللدائن يشابه الاختلاف الموجود بين أنواع الصلب الكربوني المختلفة.

من الممكن صناعة المنتجات من الراتنجات اللدائنية بسرعة و بأبعاد ذات سماحات متقاربة و نهاية سطحية (تشطيب) ممتازة. وغالباً ما يستعاض عن المعادن باللدائن، خاصةً عندما تكون العوامل التالية مهمة مثل خفة الوزن، الرطوبة أو مقاومة التآكل الكيميائي أو مقاومة العزل الكهربائي. فهذه المواد يمكن أن تصنع أما شفافة أو ملونة، وتميل إلى امتصاص الاهتزازات والصوت و عملية تصنيعها غالباً ما تكون أسهل من المعادن. هنالك اليوم أنواعاً مختلفة من اللدائن في الإنتاج الاقتصادي وتبدي مجالات واسعة في الخواص الفيزيائية.

إن استخدام اللدائن محدود بسبب قلة صلابتها (Strength) وقلة مقاومتها للحرارة، وقلة استقرارية أبعادها وغالباً كلفة موادها عالية. فبالمقارنة مع المعادن فهي أكثر ليونة (Softer) وأقل مطولية وأكثر قابلية على التشوه تحت تأثير الأحمال وتتحلل في درجات حرارية منخفضة. هنالك أنواع عديدة من اللدائن التي تكون قابلة للاشتعال و تتضرر بضوء الشمس. ولحسن الحظ إن هنالك توافقاً جيداً بين العديد من خواصها و لا تتفرد عادةً اللدائن بخاصية جيدة واحدة فقط. في معظم الحالات سنستخدم مصطلح بوليمر عوضاً عن المصطلح لدائن (بلاستيك) وكلاهما غير دقيق. لان اللدائن هي مواد ليست لدنة في درجة حرارة الغرفة، أما البوليمرات فيمكن أن يتألف البوليمر من مواد مختلفة تصنع بطريقة البلمرة (Polymerization) مع تكرار الجزيئات المختلفة (وهذا يتناقض مع معنى كلمة بوليمر).

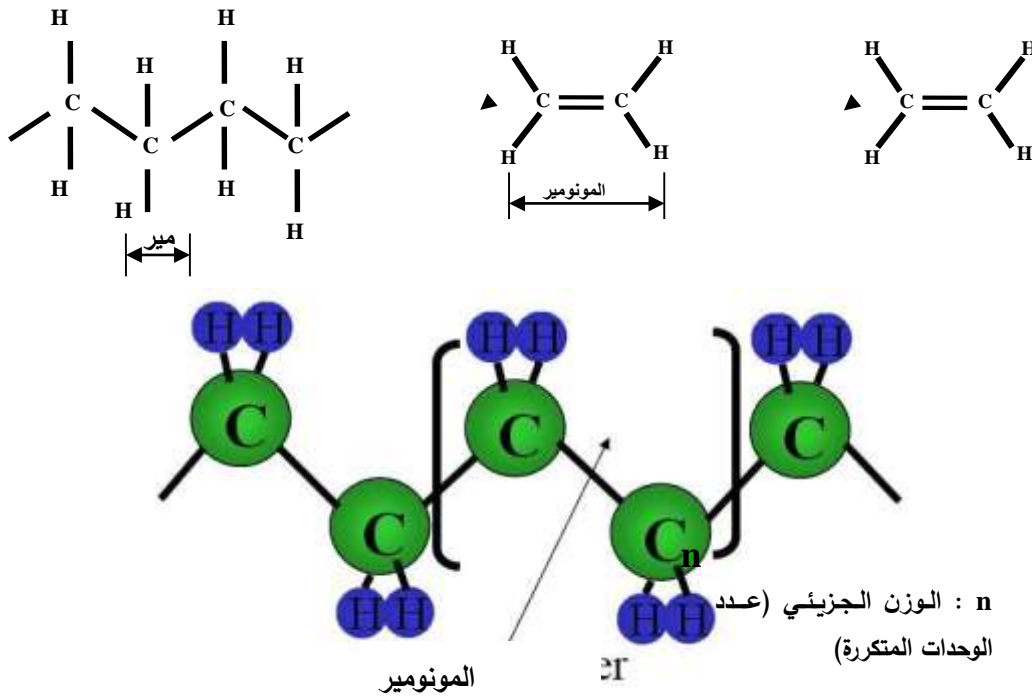
إن تعريف (ASTM) في الفقرة (D883) لللدائن بأنها مواد تتألف مكوناتها الأساسية من مواد عضوية لها وزن جزيئي كبير، تكون صلبة في حالتها النهائية و تكون ذات انسيابية بحيث يمكن تشكيلها في بعض مراحل التصنيع أو أثناء عمليات التشكيل وذلك للحصول على الشكل المطلوب.

3-1 المواد الخام (Raw Materials)

ان الجزيء الأساسي لللدائن هو الكربون وترتبط به ذرات العناصر الأخرى كالهيدروجين، الأوكسجين، النيتروجين، الكلور لتشكل الجزيئات. أما المواد الخام التي تستخدم لإنتاج اللدائن فهي البترول و الغازات المركبة. ان المواد الخام للمركبات اللدائنية تتمثل بمختلف المنتجات الزراعية و المعادن و العديد من المواد العضوية، متضمنةً مواداً كالبترول، الفحم، الغاز، الحجر الجيري، السيليكا، و الكبريت. وخلال عملية التصنيع، تضاف مواد أخرى لإجراء بعض التعديلات اللازمة عليه.

4-1 جزيئات البوليمر (Polymer Molecules)

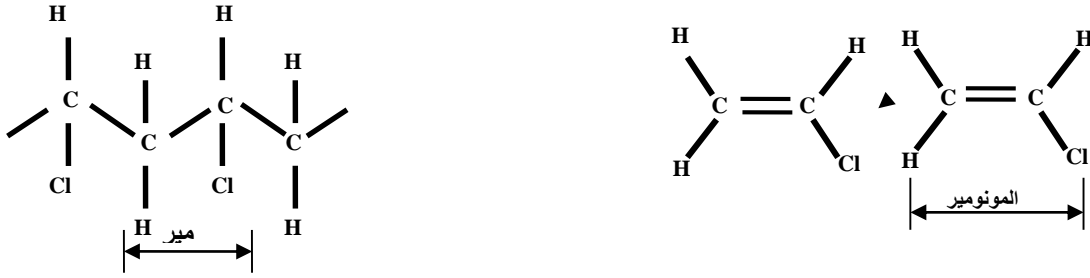
إن تكوين جزيء البوليمر هو عبارة عن تكرار لوحددة الأصل المسماة بالمير (Mer) لذلك فان مصطلح بوليمر يعني متعدد الأصل. يتم الحصول على المير من جزيئات منفردة تدعى مونومير (Monomer)، و يحدث الترابط فيما بين هذه الجزيئات بعد حدوث انتقال اليكتروني فيها مكونةً جزيئة البوليمر الكبيرة. إن أبسط نوع لجزيئة البوليمر تتمثل بالبولي أثيلين $(C_2H_4)_n$ ، حيث أن وحدته الأصل (المير) هي الأثيلين، وهو مركب هيدروكربوني له شكل التركيب المبين في الشكل (1-1).



شكل (1-1) بلمرة الأثيلين، كل خطوة تتمثل في كسر الرابطة الثنائية وتكوين رابطتين أحاديتان.

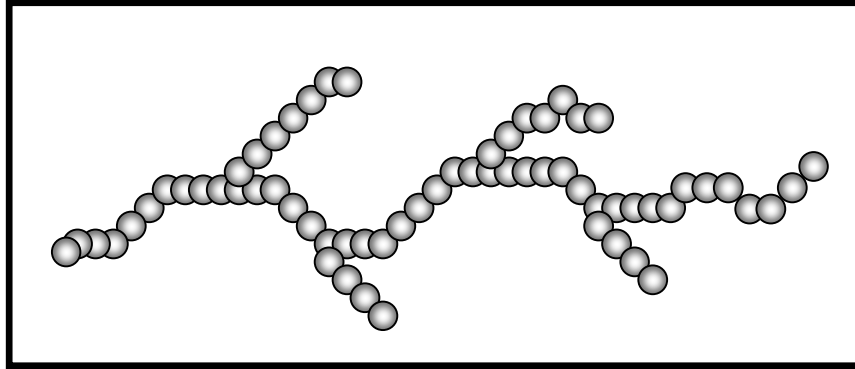
حيث يحدث تغييراً كيميائياً في الترابط الالكتروني فيسمح بتكوين المير دون حدوث تغييراً في التركيب الذري للمونومير، ثم تترايط الميرات فيما بينها مكونة جزيئة البولوي أثيلين. لذلك فان جزيء البوليمر سيتألف من سلسلة من ذرات الكربون، كل واحدة من هذه الذرات ستكون مترابطة مع ذرتي هيدروجين.

أن تكون التراكيب العديدة لجزيئات البوليمرات الأخرى ستكون مشابه تماماً لتركيب البولوي أثيلين، فمثلاً عند استبدال مونومير الأثيلين بمونومير كلوريد الفينيل (C_2H_3Cl)، سيكون الناتج هو بولي فينيل كلورايد والمعروف بالـ(بي في سي) (PVC). وسيكون هنالك اختلافاً واحداً من ناحية واحدة فقط في تركيب الاخير عن تركيب البولوي أثيلين، هو أنه كل ذرة كلور ستتريح ذرة هيدروجين أخرى وفي جانب واحد من السلسلة الرئيسية وكما موضح في الشكل (1-2).



شكل (1-2) بلمرة كلوريد الفينيل كما هي الحالة في البولي أثيلين، ضرورة وجود آصرة مزدوجة.

أن السلسلة في كثير من المواد المتبلرة هي في الحقيقة تكون أكثر تعقيداً، فمثلاً في البوليمر الطبيعي (السليولوز) تكون عبارة عن اتحاد معقد لمجموعة ذرات الهيدروجين و الأوكسجين والكربون وبتهيئز السلسلة الرئيسية لجريء البوليمر بالتشعبات (Branches)، سيكون باستطاعة كيمائي البوليمر تغيير الظروف التي سيحدث فيها التبلر، وبإمكانه أرغام هذه التشعبات على تكوين مسافات ذات نسق جيد و التحكم في أطوالها كما مبين في الشكل (1-3).



شكل (1-3) سلسلة بوليمر متفرع كل كرة تمثل وحدة جزيئة البوليمر.

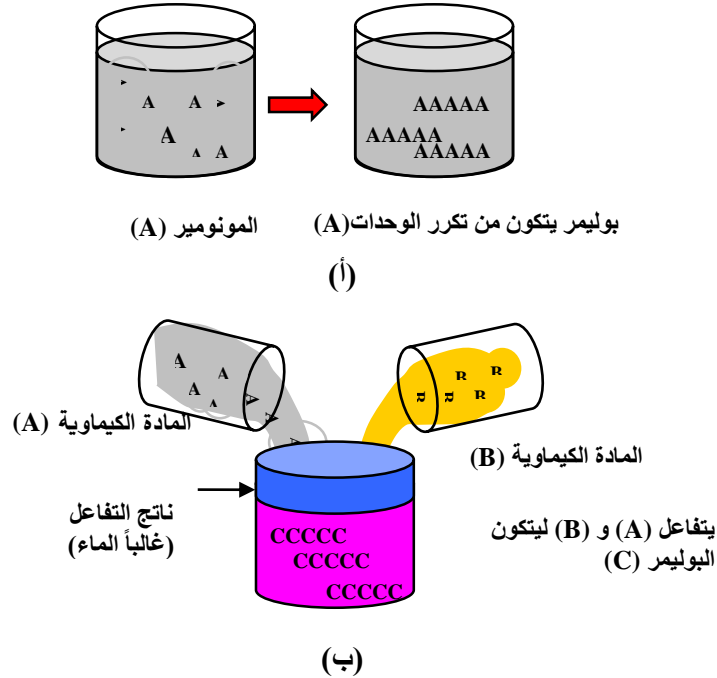
لذا سيكون باستطاعة كيمائي البوليمر إنتاج جزيئتي بوليمر متطابقتان في التركيب الكيمائي و مختلفتان في الخواص لأن الشكل البنائي لتلك الجزيئتين يمكن ان يتغير.

5-1 كيف تُصنَع جزيئات البوليمر (Polymerization Reaction)

تتألف البوليمرات من سلاسل طويلة من جزيئات متكررة، و هنالك طريقتين رئيسيتين يمكن ان تحصل فيها هذه الجزيئات الفردية على الارتباط ببعضها البعض، فمن الممكن ان تكون الجزيئات متصلة فيزيائياً كضفيرة الخرز في خيط المسبحة، أو ان يكون اتصال الجزيئات نتيجة لحدوث تفاعل كيميائي. الأول يسمى بالبلمره بالإضافة (Addition Polymerization)

والثاني يسمى بالبلمرة بالتكثيف (Condensation Polymerization). بالبلمرة بالإضافة فإن المادة الابتدائية ستكون مونومير على شكل محلول، أو مستحلب (Emulsion)، أو بخار أو حتى شحنة غير معبأة (Bulk) و سيكون البوليمر الناتج من عملية البلمرة له نفس الوحدات (Units) المتكررة كالمونومير الابتدائي.

في عملية البلمرة بالتكثيف، ستكون الجزيئات المتكررة في سلسلة البوليمر الناتج مختلفة عن المادة الابتدائية المستخدمة. ويستخدم الماء غالباً في عمليات التفاعل الكيماوي، لذلك يستخدم مصطلح التكثيف. و الشكل (1-4) يوضح هاتين الطريقتين للبلمرة. من الواضح أن هذين التفاعلين ليسا بهذه البساطة كما موضحاً بالشكل (1-2). فعادةً ما نحتاج إلى مُحفِّز (Catalyst) في شكل ما لكي نبدأ تفاعلي البلمرة بالإضافة أو بالتكثيف.



شكل (1-4) تفاعل البلمرة؛ (أ) بالإضافة؛ (ب) بالتكثيف.

تتكون المواد المتبلمرة عندما يتم الترابط بين الجزيئات الصغيرة تساهمياً عند نهايتيهما مكونة سلسلة طويلة من الجزيئات. ولإجبار المونومير على هذا النوع من الترابط، يقوم كيميائي البلمرة بإزالة إلكترون واحد من كل الذرات التي تقع في النهاية ليتكون المير. وهناك طريقتين شائعتين يستطيع بواسطتهما الكيماوي أن يجبر المونومير على فقدان هذا الإلكترون وهما البلمرة بالإضافة و البلمرة بالتكثيف واللذان سنتطرق إليهما فيما بعد.

أثناء عملية التبلمر، من الضروري ان يتم التحكم الدقيق في الوقت و درجة الحرارة والضغط ونوع العامل المُحفِّز، حيث تتحكم هذه العوامل بنوع جزيئة البوليمر المنتج و طولها وإذا رغبتنا

بحجم تشعباتها أيضاً. من الناحية العملية أن كل عملية بلمرة ستحتاج لعامل مساعد، فقد أستخدم العالم ليو باكيلاند (Leo Backeland) الحامض كعامل مساعد في إنتاج بوليمر فورميلدهيد الفينول. وفي كثير من الطرق التجارية لإنتاج البولييمرات، تعمل الجزيئات المعقدة كعامل مساعد.

6-1 أوضاع الترابط على المير (الوظيفية) (Functionality)

لإتمام عملية البلمرة، يجب أن يكون هنالك أعداد كافية من الروابط في المونومير والتي يمكن كسرها لغرض الترابط مع الميرات الأخرى والتي قد يكون لها نفس التركيب الكيماوي أو قد تختلف عنه، ويطلق على هذا العدد من الروابط التي يمتلكها المونومير بالوظيفية (Functionality). فيجب أن يكون المونومير ثنائي الوظيفة على الأقل لحدوث البلمرة، أي يجب أن يكون قادراً على التفاعل مع جزيئي مونومير متجاورين على الأقل لكي يتم تكرار بناء الجزيئة مكونة جزيئات ذات حجم كبير. لذا فإن الأثيلين المستخدم بصورة واسعة في إنتاج البولي أثيلين و البولي فينيل كلورايد، هو مونومير ثنائي الوظيفة لأن الرابطة الثنائية للكربون بإمكانها الانفصال ($C = C$) ← (-C — C-) والتفاعل مع المونوميرات المتجاورة. أن شرط توفر الثنائية في الوظيفة هو ليس مقتصرًا على الرابطة الثنائية للكربون فقط، بل بالإمكان لروابط مثل (N—H) في الأمين، و (O—H) في الكحول، و (C—OH) في الحامض، التفاعل أيضاً والدخول في تفاعلات البلمرة. وفي حاله كون جزيئات المونومير ثلاثية الوظيفة (Trifunctional) أو أكثر فإن ذلك سيؤدي من خلال عملية البلمرة إلى تشكيل شبكة مترابطة أو مادة تتصلب بالتسخين تسمى بالثرموستتك (البولييمرات المتصلبة بالحرارة) (Thermosetting).

تمثل درجة البلمرة (Degree of Polymerization) (DP) عدد الميرات الموجودة في جزيء البوليمر، أو معدل طول الميرات، وتقاس بواسطة قسمة الوزن الجزيئي للبوليمر على الوزن الجزيئي للمير. وتعتبر درجة البلمرة احد العوامل المهمة لأنه كلما كان حجم هذه الجزيئات كبيراً كلما نتج عنها روابط ذات صلابة أعلى و سترتفع درجتي الانصهار أو الليونة. من الجدير بالذكر ان هنالك دائماً اختلافاً في درجة البلمرة (DP) عند قياسها لأي بوليمر ويعود السبب في ذلك الى اختلاف أطوال السلاسل في البوليمر، حيث ان هذه السلاسل لا تنمو بنفس الوقت . أن زمن النمو لكل سلسلة يكون متغيراً كذلك، ويمكن ان يقاس هذا الاختلاف ويعبر عنه إحصائياً. عموماً، يمكن تعريف البلمرة بأنها عملية كيميائية ينتج على أثرها مركب جديد وزنه الجزيئي يعادل أضعاف الوزن الذري للمادة الأصلية.

7-1 البلمرة (Polymerization)

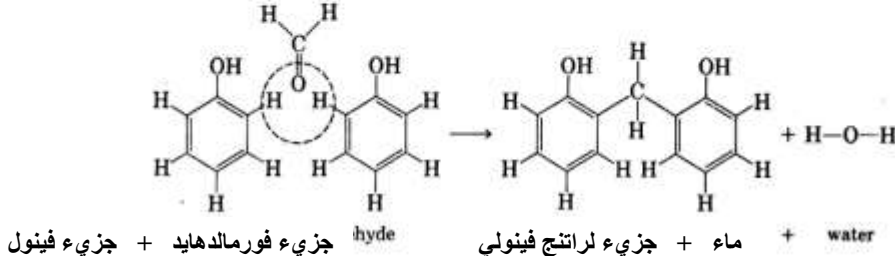
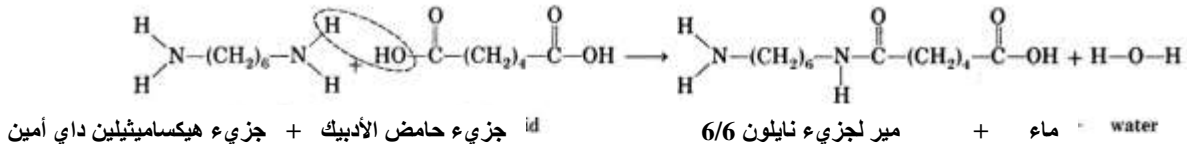
تتألف البوليمرات من سلاسل طويلة من جزيئات تكرر نفسها، و هناك طريقتان أساسيتان تحصل من خلالها الجزيئات الفردية على الارتباط ببعضها البعض، الطريقة الأولى تسمى البلمرة بالإضافة (Addition Polymerization)، حيث هنا اثنين أو أكثر من المونوميرات المتشابهة ستتفاعل مباشرة لتكون سلسلة طويلة من الجزيئات، أما الطريقة الثانية فتسمى البلمرة بالتكثيف (Condensation Polymerization)، حيث هنا يتم الترابط بين اثنين أو أكثر من المونوميرات الغير المتشابهة لتكون سلسلة طويلة من الجزيئات بالإضافة إلى ظهور ناتج عرضي هو الماء.

1-7-1 البلمرة بالتكثيف (Polymerization by Condensation)

خلال عملية تفاعل البلمرة بالتكثيف يفقد كل مونومير ذرة واحدة أو مجموعة ذرات في كل نهاية مكونة للمير. فتكون لذرات النهاية المتكونة حديثاً لكل مير الكترولونات متوفرة للترابط مع البعض الآخر مكونة جزيئات كالماء (كناتج عرضي) وبالتالي استخدمت هذه التسمية لتفاعلات البلمرة بالتكثيف. في هذه الطريقة يتم ارتباط جزيئين مختلفين أو أكثر ليكونوا جزيء جديد وهذا الأخير سيبدأ بالنمو. هذا النوع من التفاعل يمكن أن ينتج عنه إما جزيء على شكل سلسلة، كالنايلون 6/6، أو بنية شبكية، كالفينول-الفورمالدهايد (الشكل 1-5).

يكون تكوين البوليمرات الخطية بالتكثيف بصورة عامة، ذي درجة بلمرة أقل مما هو عليه في البنية الشبكية. وفي الحقيقة غالباً ما تتكون البنية الشبكية من جزيء ضخم جداً لذلك تفقد درجة البلمرة كل معنى لها. فالسلاسل تكون بصورة عامة أقوى من الشبكات لان عناصر العمود الفقري للسلسلة يربط بين ذرات الكربون وكذلك الترابط بين السلاسل يكون أعظم بسبب الروابط الهيدروجينية.

من المواد الشائعة والمصنعة بواسطة البلمرة بالتكثيف هي النايلون و البكليت. أن للتبلر بالتكثيف نزعة للتوقف قبل حصول جزيئات البوليمر على الوقت الكافي للنمو إلى الطول المطلوب. وفي أثناء النمو تقل حركة الجزيئات مع احتمال التداخل فيما بينها مشكلةً العديد من المتبلمرات القصيرة. ولكن في حالة النايلون، قد يصل طول الجزيئات إلى الطول المطلوب قبل أن تتداخل مع بعضها البعض، و لهذا فان الخواص الجيدة لهذا البوليمر قد تم المحافظة عليها. الشكل (1-5) يبين كيفية تكوين بوليمر النايلون.



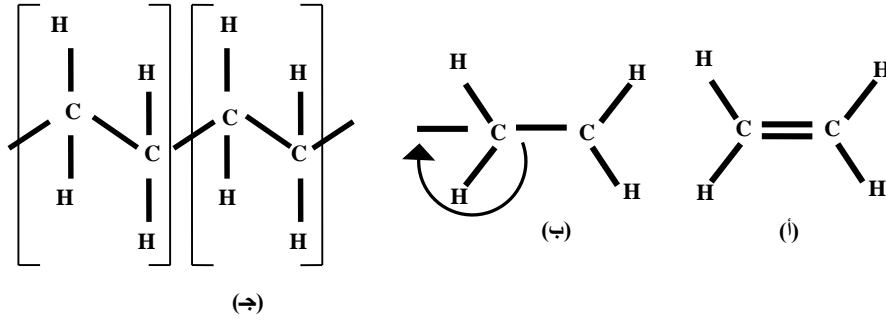
شكل (5-1) طريقة تكوين بوليمري النايلون والفينول. في النوع الأخير (الفينول)، البلمرة الكثيرة سينتج عنها البنية الشبكية. (ملاحظة: ان تفاعل الفينول - فورمالدهايد يكون أكثر تعقيداً مما مبين أعلاه، فهو يشمل خطوات وسطية عديدة).

في العديد من الحالات للمواد المتبلرة، يجب أن يتألف طول هذه السلاسل من آلاف المونوميرات للحصول على الخواص المنشودة.

2-7-1 البلمرة بالإضافة (Polymerization By Addition)

تختلف البلمرة بالإضافة عن البلمرة بالتكثيف، حيث في الأولى لا يتم فقدان أي ذرة، فالميرات تتكون بواسطة إعادة تركيب الروابط ضمن كل مونومير للذرات الموجودة في نهاية المدارات بحيث تكون جاهزة للترابط مع الميرات الأخرى مكونة سلسلة طويلة بإضافة الميرات لبعضها البعض و بالتالي تعرف هذه الطريقة بالبلمرة بالإضافة.

تقتصر البلمرة بالإضافة على التفاعلات بين المونوميرات التي يكون فيها على الأقل زوج واحد من الذرات المشتركة بأكثر من زوج من الاليكترونات مع ذرات أخرى، أي بمعنى آخر، أن هنالك رابطة مزدوجة بين بعض الذرات. أن هذا النوع من الجزيئات يتكون بشكل أساسي في المركبات الغير المشبعة كالأثيلين و كلوريد الفينيل والستيرين.



شكل (1-6) البلمرة بالإضافة (بولي إثيلين): (أ) المونومير، (ب) المير، (ج) جزيء البوليمر.

ان اتجاه الترابط بين ذرات الكربون يكون متناوباً لأن السحب الاليكترونية حول الذرات المترابطة كلياً ستتتأفر مع بعضها البعض نتيجةً لتشابه شحناتها. تتكسر الروابط المزدوجة في عملية البلمرة بالإضافة، ولكن ترتيب ذرات الجزيء يبقى على حاله فيسبب ذلك انحرافاً في الروابط الاليكترونية والذي بدوره سيؤدي الى أن تكون لذرات النهاية مدارات غير مشبعة، مما يمكنها من الترابط مع الميرات المماثلة لها والتي يكون فيها التركيب الاليكتروني قد أعيد ترتيبه بشكل مماثل. يبين الشكل (1-6) كيفية تغير الترابط في جزيئات الأثيلين لتكوين البولي إثيلين.

إن عملية إعادة ترتيب الاليكترونات بعدد أقل من الروابط المزدوجة سيجعل من التركيب أكثر استقراراً و سينتج عن ذلك تحرير للطاقة. فلو سمح للبلمرة أن تستمر إلى ما لا نهاية فقد تصبح جزيئات البوليمر طويلة للغاية لذلك جرت العادة على أن تضاف كميات قليلة من الشوائب لإيقاف نمو البوليمر ولكن الطريقة الشائعة الاستخدام الآن هي إضافة العوامل الكيماوية.

8-1 مقارنة بين البلمرة بالإضافة والبلمرة بالتكثيف

☒ بما ان البلمرة بالتكثيف تتم على شكل خطوات كما ذكرنا ذلك سابقاً، لذلك و بسبب الفرق في سرعة التفاعلات (Reaction Kinetics) فهي أبطأ كثيراً من البلمرة بالإضافة.

☒ يتكون في البلمرة بالتكثيف ناتجاً عرضياً (By Products) ويجب ان يتم تكثيفه ومنه اشتقت التسمية.

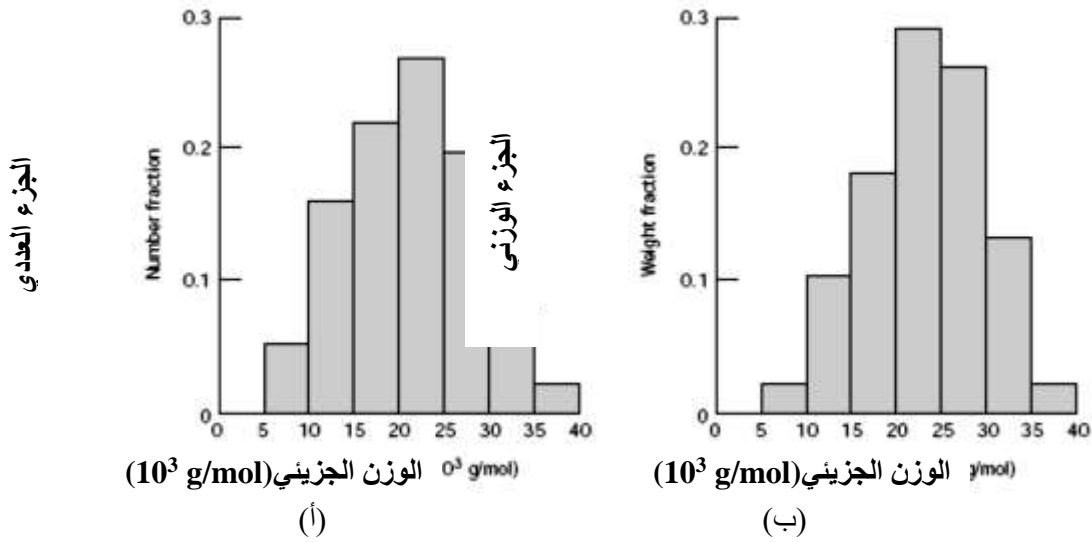
☒ تكون السلاسل أكثر متانة في عملية البلمرة بالتكثيف بسبب العناصر الموجودة في السلسلة الرئيسية المترابطة بين ذرات الكربون. والتجاذب بين السلاسل يكون أكبر بسبب الترابط الهيدروجيني.

☒ عندما يتوجب على كيميائي البلمرة ان يصنع جزيئات بوليمر طويلة فهو يستخدم طريقة البلمرة بالإضافة.

9-1 الوزن الجزيئي (Molecular Weight)

ان أهم ما تمتاز به اللدائن هو انها تتألف من سلاسل طويلة جداً والوزن الجزيئي لها كبير جداً. فخلال عملية البلمرة والتي يتم صنع الجزيئات الماكروية (Macromolecules) من الجزيئات الصغيرة، لا تنمو السلاسل بنفس الأطوال فينتج عن ذلك اختلافاً في أطوال السلاسل أو أوزانها الجزيئية. بالإمكان تحديد معدل الوزن الجزيئي والذي يمكن إيجاده عن طريق قياس الخواص الفيزيائية المختلفة كاللزوجة والضغط التناظفي (Osmotic Pressure).

هنالك طرائق عديدة يمكن بواسطتها تحديد معدل الوزن الجزيئي. فلتحديد معدل الوزن الجزيئي \bar{M}_n ، يتم تحديده بتقسيم السلاسل إلى مجموعة من مديات للأحجام ومن ثم إيجاد النسبة المئوية لأطوال السلاسل لكل طول (شكل 1-7أ).



شكل (1-7) التوزيع الحجمي الجزيئي الافتراضي (أ) الأجزاء العددية للجزيئات؛ (ب) الأجزاء الوزنية للجزيئات.

ان الرقم الذي يمثل معدل عدد الوزن الجزيئي يمكن ان نعبر عنه بالمعادلة التالية:

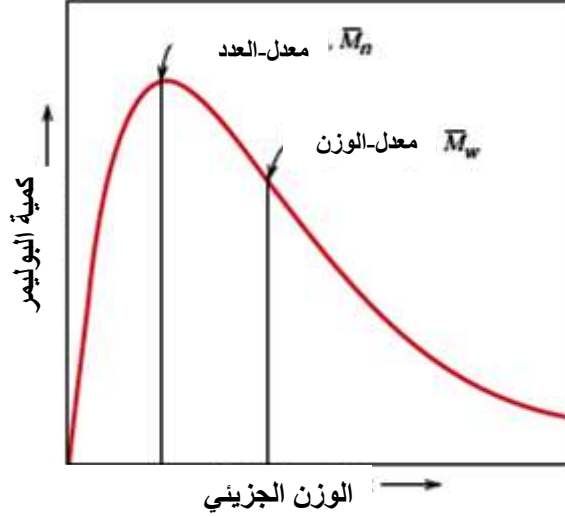
$$\bar{M}_n = \sum x_i M_i \dots\dots\dots(1-1)$$

حيث أن (M_i) يمثل متوسط الوزن الجزيئي لمدى الحجم (i) و (x_i) هو جزء العدد الكلي للسلاسل ضمن مدى الحجم المطابق.

يعتمد معدل وزن-الوزن الجزيئي \bar{M}_w على وزن جزء من الجزيئة ضمن مديات الحجم المختلفة (الشكل 1-7-ب) ويحسب بالمعادلة التالية:

$$\bar{M}_w = \sum w_i M_i \dots\dots\dots(2-1)$$

حيث أن M_i تمثل متوسط الوزن الجزيئي ضمن المدى الحجمي، و w_i تمثل جزء الوزن الجزيئي ضمن نفس المدى الحجمي. يمكن إجراء حسابات كل من معدل العدد الجزيئي ومعدل الوزن الجزيئي بحسب المثال (1-1). ان التوزيع الشائع للوزن الجزيئي على طول معدلات الوزن الجزيئي هو كما مبين في الشكل (1-8).



شكل (1-8) توزيع الوزن الجزيئي الشائع في البوليمرات.

وتستخدم درجة البلمرة (Degree of Polymerization) كإحدى الطرائق البديلة للتعبير عن معدل حجم السلسلة في البوليمرات، ويرمز لها بـ (n) وهي تمثل معدل عدد وحدة المير في السلسلة.

ويمكن تحديد درجة البلمرة من معدل العدد (n_n) أو من معدل الوزن (n_w) وذلك بحسب المعادلات التالية:

$$n_n = \left(\frac{\bar{M}_n}{m} \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$n_w = \left(\frac{\bar{M}_w}{m} \right) \dots\dots\dots (4.1)$$

حيث أن (\bar{M}_w) و (\bar{M}_n) هما معدل العدد والوزن الجزيئي كما تم تعريفهما سابقاً و \bar{m} هي الوزن الجزيئي للمير. في حالة البوليمرات المشتركة (Copolymers) والتي تمتلك عادةً زوج من المير أو أكثر، فإن \bar{m} يتم إيجادها بحسب المعادلة التالية:

$$\bar{m} = \sum f_j . m_j \dots\dots\dots (5.1)$$

حيث ان (f_j) و (m_j) هما جزء السلسلة والوزن الجزيئي للمير (j) .

مثال (1-1):

أفرض ان التوزيع للوزن الجزيئي والمبين في الشكل (1-7) هو للبولي فينيل كلورايد (PVC) . احسب لهذه المادة :

أ- معدل عدد الوزن الجزيئي.

ب- معدل عدد درجة البلمرة.

ج- معدل وزن الوزن الجزيئي.

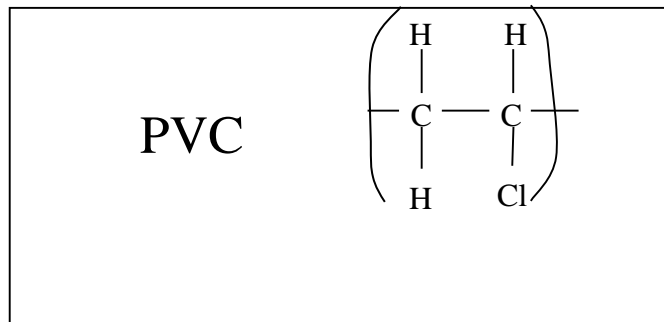
الإجابة:

أ- البيانات الضرورية للحساب هي كما مأخوذة من الشكل (1-7-أ) وممثلة بالجدول (أ). وبحسب المعادلة (1-1) فان مجموع جميع القيم لـ $(x_i M_i)$ من العمود الأيمن سيعطي معدل عدد الوزن الجزيئي والذي هو في هذه الحالة (21150 g/mol).

جدول (أ) البيانات المستخدمة لحساب المعدل الوزن الجزيئي للمثال (1-1).

Molecular Weight Range (g/mol)	Mean M_i (g/mol)	x_i	$x_i M_i$
5,000-10,000	7,500	0.05	375
10,000-15,000	12,500	0.16	2000
15,000-20,000	17,500	0.22	3850
20,000-25,000	22,500	0.27	6075
25,000-30,000	27,500	0.20	5500
30,000-35,000	32,500	0.08	2600
35,000-40,000	37,500	0.02	750
			$\bar{M}_n = 21,150$

ب- لإيجاد معدل عدد درجة البلمرة (المعادلة 1-3)، فمن الضروري أولاً ان نحسب وزن جزيء المير الواحد للبي في سي (PVC) ، حيث ان كل مير سيتألف من ذرتي كربون وثلاث ذرات هيدروجين وذرة كلور واحدة (شكل مثال 1-1).



شكل مثال (1-1) مير البي في سي.

بالإضافة الى ذلك فان الأوزان الذرية للكربون والهيدروجين والكلور هي (12.01 , 1.01 , 35.45) (g/mol) بحسب الترتيب. لذلك فان للبي في سي:

$$\bar{m} = 2(12.01 \text{ g/mol}) + 3(1.01 \text{ g/mol}) + 35.45 \text{ g/mol}$$

$$\therefore \bar{m} = 62.5 \text{ g/mol}$$

$$n_n = \left(\frac{\bar{M}_n}{\bar{m}} \right) = \left(\frac{21150 \text{ g/mol}}{62.5 \text{ g/mol}} \right) = 338$$

ج- الجدول (ب) يبين البيانات لمعدل وزن الوزن الجزيئي كما تم أخذها من الشكل (1-7-7-ب). ان حاصل ضرب $(w_i M_i)$ للأحجام العديدة هي كما مدرجة في العمود الذي على اليمين، مجموعها (المعادلة 1-2) سيمكننا من تحديد (\bar{M}_w) بمقدار 23200 (g/mol).

جدول (ب) البيانات المستخدمة لحساب وزن معدل الوزن الجزيئي للمثال (1-1).

Range (g/mol)	(g/mol)	w_i	$w_i M_i$
5,000-10,000	7,500	0.02	150
10,000-15,000	12,500	0.10	1250
15,000-20,000	17,500	0.18	3150
20,000-25,000	22,500	0.29	6525
25,000-30,000	27,500	0.26	7150
30,000-35,000	32,500	0.13	4225
35,000-40,000	37,500	0.02	750
			$\bar{M}_w = 23,200$

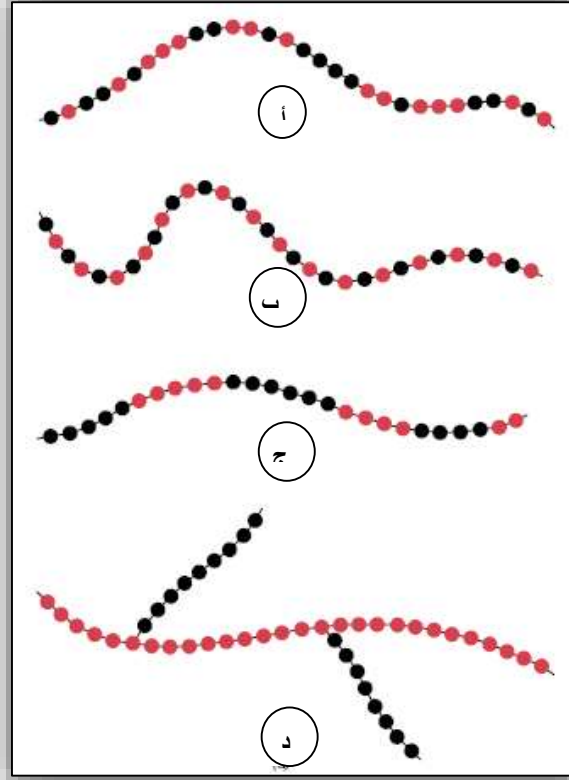
تتأثر العديد من خصائص اللدائن بقيمة الوزن الجزيئي، وأحد هذه الخصائص هي درجة حرارة الانصهار أو درجة حرارة الليونة، حيث تزداد درجة الانصهار بزيادة الوزن الجزيئي (لقيمة \bar{M} لغاية 100,000 g/mol). في درجة حرارة الغرفة، اللدائن ذات الأوزان الجزيئية لغاية (100 g/mol) تتواجد بشكل سوائل أو غازات. أما اللدائن التي تمتلك أوزاناً جزيئية في حدود الـ (1000 g/mol) فهي تكون شمعاً صلباً (كشمع البارافين) والرتنجات اللينة. اللدائن الصلبة والتي هي محل الأهتمام هنا غالباً ما تمتلك وزناً جزيئياً ما بين (10,000) ولغاية ملايين عديدة من (g/mol).

10-1 أشكال وأسلوب بناء جزيئات البوليمر

(Shapes and Architecture of Polymer Molecules)

بأستطاعتنا أن نحصل على الخواص المطلوبة للبوليمر عن طريق التحكم في تصميم شكل و أسلوب بناء جزيئات البوليمر، ومن الطرق المستخدمة لهذا الغرض هي:

1. باستخدام مجموعة من الميراث عوضاً عن نوعٍ واحدٍ، وتدعى بالمواد المتبلّمة المشتركة (Copolymers)، فمثلاً يمكن ان تترابط ميراث كلوريد الفينيل (Vinyl Chloride) وميراث أسيتات الفينيل (Vinyl Acetate) لتكون جزيء بوليمر. كما ويمكن ان نسيطر على تتابع الميراث كما في الشكل (9-1).



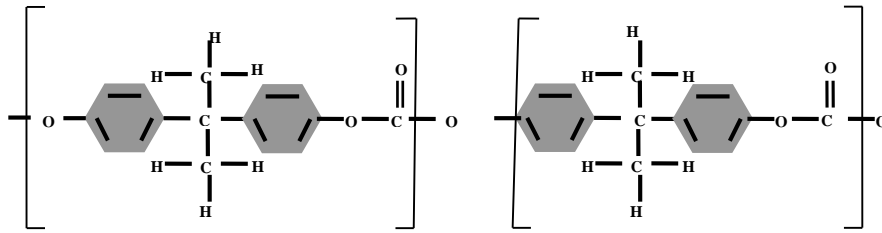
شكل (9-1) ترتيب البوليمرات المشتركة

- أ. نوعان مختلفان من الميراث ترتيبهما بالتناوب
- ب. نوعان مختلفان من الميراث تم ترتيبهم بصورة عشوائية
- ج. نوعان مختلفان تم ترتيبهم بهيئة مجاميع بنائية
- د. نوعان مختلفان مطعمان بشكل تشعبات

2. إذا حلت ذرات كربونية حلقة محل ذرات الكربون في السلسلة الرئيسية فان السلسلة ستزداد متانة ويكون الناتج جزيئات بوليمر متحولة إلى كتل متبلّمة قوية و صلدة. إحدى أنواع اللدائن المطورة حديثاً يدعى بالبولي كاربونيت (Polycarbonate) والمعروف تجارياً باسم ليكسان (Lexan) وهو من الصلابة بحيث يمكنه ان يتحمل ضربات المطرقة وله مجموعة حلقة الشكل في السلسلة الرئيسية لجزيء البوليمر كما مبين في الشكل (10-1).

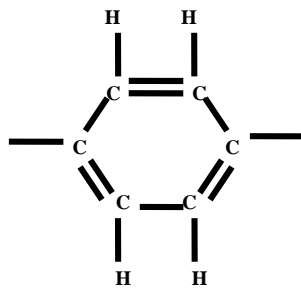
3. يمكن إحلال الحلقات الكربونية المعقدة محل ذرات الهيدروجين في السلسلة الرئيسية. فمثلاً في حالة البولي ستايرين يمكن لحلقة البنزين في مونومير الستايرين ان تحل محل ذرة واحدة من ذرات الهيدروجين في مونومير الأثيلين، مما يجعل المادة المتبلرة أكثر صلادة وصلابة ومتانة وذي درجة ليونة أعلى من تلك التي للبولي أثيلين كما مبين في الشكل (11-1).

4. يمكن تجهيز التشعبات لجزيئات البوليمر ومن أهم الأمثلة على ذلك هو البولي أثيلين المتشعب. حيث يمكن لذرات الكربون في السلسلة الرئيسية ان تعتبر كذرات لبداية التشعب الجانبي والذي تشابه ميراته لميرات جزيء البوليمر.



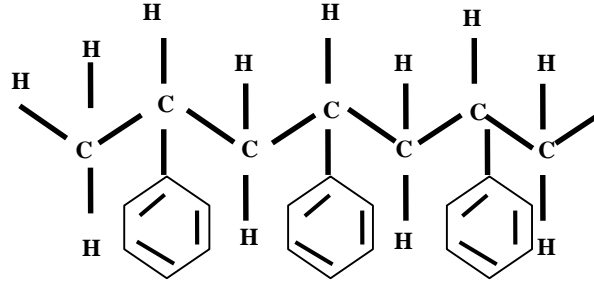
(أ)

شكل (10-1): (أ) زوج من ميرات جزيء البولي كربونيت حيث ان وجود حلقة البنزين تزيد السلسلة صلابة و قوة. (ب) التركيب الذري للوحدات السداسية الشكل (حلقات البنزين)



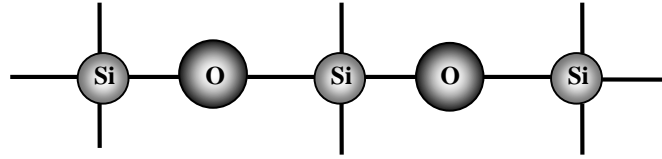
(ب)

5. إمكانية استخدام مونومير غير عضوي. ففي جزيئات البوليمر التي تم التحدث عنها سابقاً تتكون السلسلة الرئيسية عادةً من مادة عضوية، أي بمعنى آخر تتألف بشكل أساسي من ذرات الكربون أو من مجاميع لذرات الكربون. أن قابلية البوليمرات العضوية لتحمل درجات الحرارة العالية محدودة بالإضافة إلى كونها فعالة كيميائياً. أما بوليمرات



شكل (11-1) جزيء بولي إيثيلين ستيارين. السلسلة الجانبية لها تشبه حلقات البنزين وتمنح الجزيء قوة و متانة.

السليكون المبينة في الشكل (12-1) تعتبر الأكثر استقراراً كيميائياً فهي لها القدرة على تحمل درجات الحرارة العالية وتعتبر عوازل حرارية فائقة الجودة.



شكل (12-1) السليكون، وهو كالكربون يحتوي على أربعة اليكترونات في مداره الخارجي.

11-1 أنواع البوليمرات (Types of Polymers)

يمكن تصنيف البوليمرات نسبة إلى خصائص درجات الحرارة العالية (Elevated Temperature Characteristics) أو العائلات الكيميائية (Chemical Families).

ان جميع البوليمرات الاصطناعية في الطبيعة هي أما من نوع الترموبلاستيك (اللدائن الحرارية) أو من نوع الترموستاتك (اللدائن التي تتصلب بالتسخين)، وهذا يعني أن بعض البوليمرات ينصهر وينساب عندما يسخن إلى درجة حرارة مرتفعة و النوع الآخر يتصلب أو يتبلر بعملية التسخين. ان لدائن الترموبلاستيك سوف تنصهر عند درجات الحرارة العالية و هذا النوع من اللدائن يمكن أن يعاد تسخينه عدة مرات ومن ثم استخدامه مرة أخرى. ان معظم مصانع اللدائن تعمل حالياً على إعادة استخدام اللدائن (التدوير) للمنتجات اللدائنية القديمة بعد تقطيعها وتنظيفها من الشوائب. بالجانب الآخر فان لدائن الترموستاتك حالما يتم تصنيع جزء منها أما بواسطة الترابط المستعرض (Cross linking) أو البلمرة (Polymerization) باستخدام الحرارة و الضغط أو عملية التحفيز (Catalyzing Operation) فإنها سوف تتصلب ولا يمكن

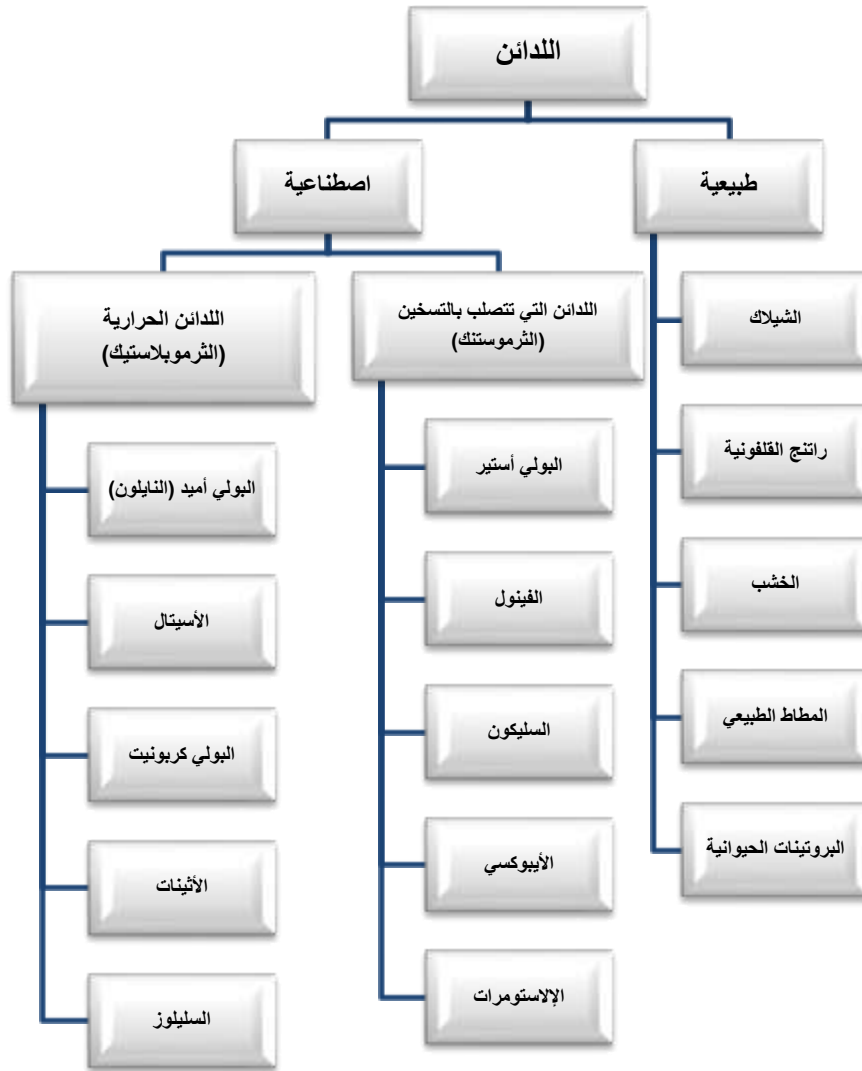
صهرها بالتسخين و غالباً ما يحدث لها تقحم (Char) أو تحترق أو في بعض الحالات تتسامى (Sublime). أي ان هذا النوع من اللدائن يستخدم لمرة واحدة فقط ولا يمكن إعادة استخدامه. ابتداءً إذا كان البوليمر من نوع الترموبلاستيك أو الترموستيك فإنه سيحدد بمعرفة طبيعة المونومير والروابط بين السلاسل. كما سوف نرى في تقنيات التشكيل، فان خواص مواد الترموبلاستيك و الترموستيك لها تأثير كبير على ما يمكن عمله مع البوليمر من الناحية الهندسية.

المعنى الآخر الرئيسي لتصنيف البوليمرات هو العائلات الكيميائية والذي نعني به انه يمكن تصنيف أنواعاً مختلفة من البوليمرات بتغير المجموعات الاستبدالية لبعض المونوميرات الأساسية (مثلاً استبدال ذرة الكلور لذرة هيدروجين بغير البولي أثيلين إلى بولي فينيل كلورايد).

ان التصنيف المبين في الشكل (1-13) يمثل التصنيف العام لللدائن، ومن الجدير بالذكر أن هذا المخطط لا يحتوي على جميع اللدائن الهندسية لأن عائلات جديدة قد تظهر يوماً في الصناعة بواسطة كيميائيو البلمرة. لكن اللدائن المدرجة هي الشائعة حالياً. اللدائن الطبيعية لا تستخدم في التصميم. من المناسب ان تدرج اللدائن الاصطناعية تحت صنفين رئيسيين هما: اللدائن الحرارية (الترموبلاستيك) (Thermoplastic) وهي النوع الذي يُلدن أو يتلين بالحرارة، واللدائن التي تتصلب بالتسخين (الترموستيك) (Thermosetting) وهذا النوع يمكن استخدامه لمرة واحدة فقط.

فاللدائن الحرارية (الترموبلاستيك) هي بلمرات خطية وتتكون من جزيئات ضخمة مستقيمة أو جزيئات متفرعة، و كذلك يمكن ان تلين بالتسخين و تتصلد بالتبريد. ويمكن تكرار تسخين و تبريد البوليمر الواحد ما دام انه لم يسخن الى درجة التتكك. ويعزى ذلك الى ان سلاسل هذا البوليمر ترتبط فقط بواسطة القوى البين جزيئية والضعيفة نسبياً (قوى فان دار فال) و التي تسمح لسلاسل البوليمر بالتحرك و الانزلاق بسهولة تحت أي تغيرات حرارية ولو كانت قليلة. ويعتمد مقدار هذه القوى البين الجزيئية على طول السلسلة (الوزن الجزيئي) وعلى المجموعات القطبية الواقعة على السلسلة و على طريقة حشو و ترتيب هذه السلاسل.

اما اللدائن التي تتصلب بالتسخين (الترموستيك)، وتسمى ايضاً بالبوليمرات المتقاطعة أو الشبكية فهي تُلدن أو تلين عند بدأ التسخين ثم تتحول الى راتنج (Resin) غير قابل للانصهار مع استمرار التسخين.



شكل (1-13) مخطط يبين أنواع اللدائن.

ويعزى ذلك إلى أن اللدائن التي تتصلب بالتسخين (الثرموستك) وقبل استخدامها النهائي، تتألف من سلاسل خطية ذات مجموعات عديدة نشطة أو قد تمتلك روابط مزدوجة موزعة على طولها وقادرة على تكوين وصلات عرضية (Cross Links) مع استمرارية تفاعل البلمرة. ويحدث ذلك أما بالتسخين أو بإضافة مواد مساعدة خاصة حيث ينتج عن ذلك روابط شبكية ثلاثية الأبعاد مما يجعل البوليمر غير قابل للانصهار أو الذوبان. ويحدد عدد وطول هذه الوصلات العرضية وكذلك توزيعها، مقدار الصلابة للتركيب الشبكي الناتج في الأبعاد الثلاثة. وحيث أن هذه الوصلات العرضية هي روابط تساهمية قوية، فإنه لا يمكن كسرها إلا في درجات الحرارة العالية والتي يتحلل عندها البوليمر بالكامل. فهذا النوع من اللدائن والذي يتصلب بالتسخين و الذي

يتميز بامتلاكه وصلات عرضية كاملة، غير قابل للانصهار أو الذوبان في جميع التطبيقات العملية، ولا يمكن إعادة صهره أو صياغته مرة ثانية.

12-1 أشكال جزيئات البوليمر (Polymer Molecule Forms)

على الرغم من ان معظم جزيئات البوليمر طويلة و رقيقة إلا إنها تختلف من حيث الكيفية التي تمتد فيها في الفضاء. وبصورة عامة يمكن أن تتخذ الجزيئات ثلاثة أشكال رئيسية:

أ. الجزيئات المستقيمة نوعاً ما أو القصيبية (Fairly Straight or Rodlike)

ب. الجزيئات الملتفة عشوائياً (Randomly Coiled)

ج. الجزيئات الحلزونية (Helical)

هنالك عوامل كثيرة تحدد الشكل أهمها موقع الذرات أو مجموعة الذرات المتصلة بالسلسلة الرئيسية. وغالباً ما تكون هذه الذرات محاطة بسحب سالبة الشحنة وتحاول ان تنفر من بعضها البعض، خاصةً عندما تكون هنالك مجموعة كبيرة من الذرات المتصلة بالسلسلة الرئيسية، و بالطبع توجد هنالك قوى جذب بين الذرات في جزيء البوليمر وان شكل الجزيء هو نتيجة تعادل هذه القوى. كلما ازدادت قوة التجاذب كلما ازدادت الجزيئات صلابةً و صلادةً.

والأنواع الثلاثة العامة التي يوجد عليها الترتيب البوليمري هي:

1. الترابط المستعرض (Cross Linkage)

2. اللاشكلي (غير المتبلور) (Amorphous)

3. المتبلور (Crystalline)

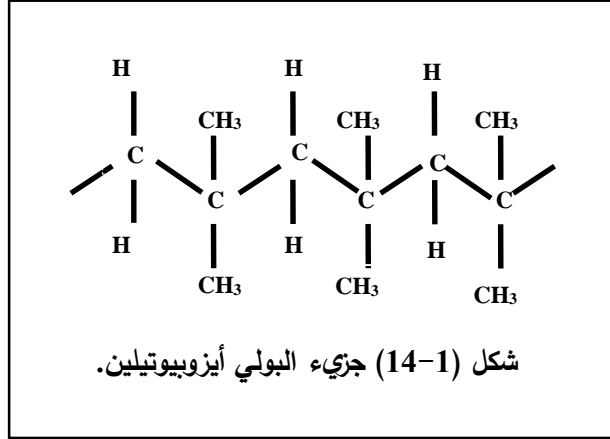
1-12-1 الجزيئات المتناظرة (Symmetrical Molecules)

في الغالب تكون هنالك حرية للدوران لذرات الكربون في السلسلة الرئيسية وعندما تدور، تحمل الذرات الجانبية إلى مواقع جديدة حول السلسلة الرئيسية. أن ذرات الكربون تحاول الدوران إلى وضع بحيث تجعل الذرات الجانبية بترتيب يكون فيه التناظر في أدنى حالاته.

في بعض الجزيئات المتناظرة كجزيء البولي أثيلين، يحدث هذا في نمط المعوّج (Trans)، إذ تشكل ذرات الكربون طريقاً متعرجاً (Zigzag Road) وتترتب عليه بخط مستقيماً نوعاً ما، حيث يصطف كل زوج آخر من ذرات الهيدروجين المترابطة مع ذرة الكربون بنفس الوضع حول السلسلة الرئيسية. بهذا الترتيب تكون ذرات الهيدروجين متباعدة عن بعضها البعض كتباعدهم في جزيء البولي أثيلين، أنظر الشكل (1-2).

وفي حالة انحراف السلسلة (أي إذا توجب على السلسلة أن تدور يميناً أو يساراً)، ستصبح ذرات الهيدروجين أقرب لبعضها البعض مما هو عليه في النمط المعوّج، وعليه تكون الطاقة

اللازمة لمسك الجزيء بهذه الوضعية أكبر. نظراً لكون جزيئات البولي أثيلين مستقيمة نوعاً ما و صلبة لذلك فهي تصطف بطريقة مشابهة تماماً لاصطفاف المعكرونة في صندوق. في الجزيئات المتناظرة الأخرى، عند اخذ الطاقة بنظر الاعتبار، قد يفضل كلا النمطين المنحرف و المعوّج (Trans and Skewed). والمثال النموذجي على هذه الحالة هو جزيء البولي أيزوبوتيلين (Polyisobutylene) والمعروف بمطاط البيوتيل (Butyl Rubber) حيث ان جزيء هذا البوليمر يشبه جزيء البولي أثيلين مع إحلال مجموعة (CH₃) محل كل زوج آخر من ذرات الهيدروجين المتأصرة مع السلسلة الرئيسية. وتكون قوى التنافر بين مجاميع (CH₃) متساوية في جميع الأشكال، جزيء البوليمر يدور ويلتوي عشوائياً أما الى اليمين أو اليسار ويلتف بالاتجاه الذي يبدي التغيير (أنظر الشكل 1-14).

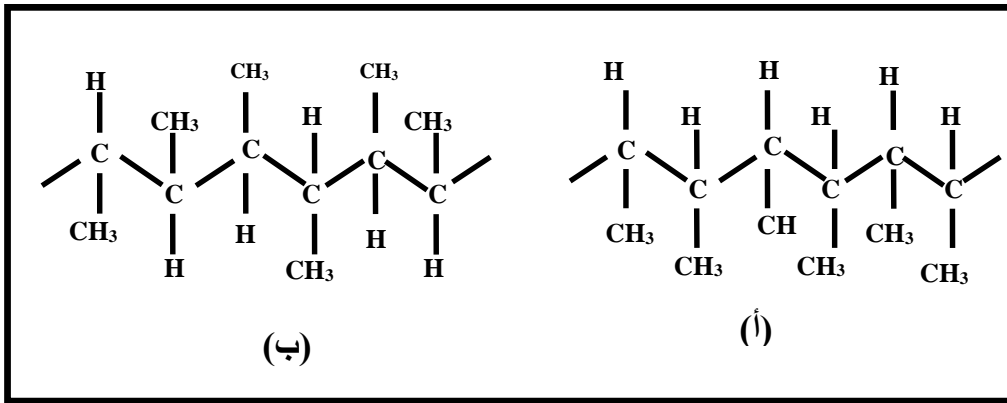


يتطلب تغيير اتجاه وحدة واحدة من جزيء البولي أيزوبوتيلين من اعوجاجاً يمينياً إلى اعوجاجاً يسارياً أو إلى النمط المتعرج، إلى طاقة قليلة جداً لتغيير. تتكون القطعة الواحدة من البولي أيزوبوتيلين من مجموعات كبيرة من الجزيئات الملتفة حول بعضها البعض. عندما نقوم بشد قطعة من البولي أيزوبوتيلين يقل عدد الأشكال الملتفة بين نقاط التشابك، وعند إزالة الشد ترجع القطعة إلى الشكل الأصلي. البوليمرات التي لديها هذا السلوك تدعى بالإلاستمرات (Elastomers). ويستخدم مطاط البيوتيل استخداماً واسعاً في صنع إطارات السيارات.

2-12-1 الجزيئات الغير المتناظرة (Asymmetrical Molecules)

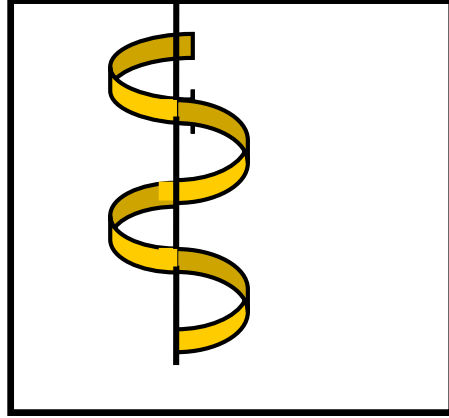
في هذا النوع من الجزيئات يجوز لذرة في السلسلة الرئيسية أن تترايط مع ذرة أثقل أو مجموعة ذرات على جانب واحد فقط. البولي بروبيلين (Polypropylene) مثلاً تحتوي كل ذرة كربون أخرى في السلسلة الرئيسية على ذرة هيدروجين في جانب واحد ومجموعة (CH₃) على

الجانب الآخر. تكون المونوميرات عند تبلورها بالطرائق الاعتيادية، أتاكتك بولي بروبيلين (Atactic Polypropylene) حيث تترتب مجاميع (CH₃) عشوائياً على جانبي الجزيء. كما يلتف الجزيء عشوائياً لأن مجاميع (CH₃) تبعد بمسافات متساوية في كل الأشكال كما هو الحال مع البولي أيزوبيوتيلين. لذلك فإن الأتاكتك بولي بروبيلين هو ألستمر (Elastomer). بالانتقاء الجيد للعامل المساعد، يستطيع الكيماوي التحكم باللمرة لجزيئات البولي بروبيلين بحيث تتكون جميع مجاميع (CH₃) على جانب واحد من سلسلة البوليمر، وبذلك يتكون الأيزوتاكتك بولي بروبيلين (Isotactic Polypropylene)، الشكل (1-15).



شكل (1-15): أ) أيزوتاكتك بولي بروبيلين، لاحظ ان مجاميع H-C-H واقعة على جانب واحد من السلسلة الرئيسية: ب) أتاكتك بولي بروبيلين، المجاميع موزعة عشوائياً على جانبي السلسلة.

إن أكثر الأشكال استقراراً يحصل عليه عند التقاف سلسلة الجزيء باتجاه ثابت مكونةً حلزوناً منتظماً، و هذا التركيب يشبه النابض المتمد (Stretched Spring). حيث أن جزيئات البوليمر ستشبه القضيب الحلزوني وتكون قويةً ويمكن ان تترتب بشكل صفوف جنباً الى جنب لتكون أليافاً قويةً. الشكل (1-16) يوضح كيفية تكوين الحلزون عندما تكون حلقات البنزين للبولي ستارين على جهات متعاكسة من السلسلة الرئيسية.



شكل (16-1) حلزون البولي ستارين.

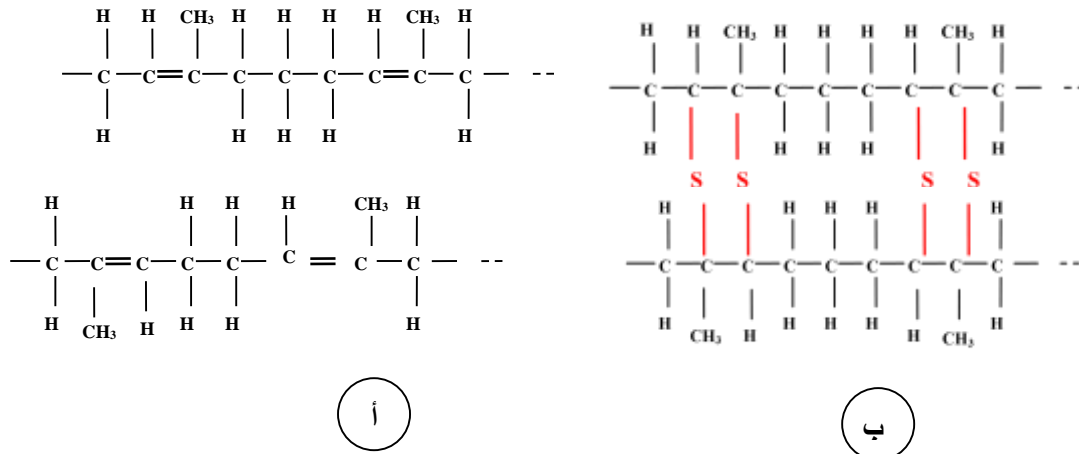
13-1 معالجة تصليد البوليمرات (الفلكنة) (Vulcanization)

أكتشف العالم تشارلز جوديير (Charles Goodyear) في عام 1846م طريقة لمعالجة المطاط لغرض تصليده، حيث تسمح هذه الطريقة للمطاط بالاحتفاظ بخواصه تحت جميع الظروف المناخية. لقد نجح باستخدامه لهذه الطريقة (الفلكنة) في تحويل المطاط الخام وهو لدن ثرموبلاستيكي الى مطاط مفلكن من نوع لدن الثرموستنك.

فالفلكنة هي مصطلح يستخدم في صناعة المطاط ليشير إلى العمليات المختلفة للترابط المستعرض. يمتلك المطاط المفلكن شكلاً غير طبيعياً من الترابط المستعرض بسبب إضافة ذرات إضافية إلى كتلة جزيئات البولي أيزوبرين وذلك نتيجة لربط جزيئات البوليمر بصورة مستعرضة.

يتحول خام المطاط (غير المفلكن) إلى مادة لينة و دبقّة عند تسخينه نتيجةً لتمكن جزيئات البوليمر من الانزلاق فوق بعضها فوق.

يعجن الكبريت في المطاط الخام الساخن خلال عملية الفلكنة، قبل قولبته بالضغط إلى الشكل النهائي عند درجات الحرارة العالية. فخلال عملية الضغط هذه ستتكسر بعض الروابط المزدوجة الموجودة بين ذرات الكربون في السلسلة الرئيسية من جزيء البوليمر مما سيمنح بعض ذرات الكربون بالترابط مع ذرات الكبريت، ونتيجةً لإمكانية الترابط بين ذرات جزيئات البوليمر المختلفة مع نفس ذرة الكبريت سينشأ الترابط المستعرض كما موضح في الشكل (17-1).



شكل (1-17) فلكنة المطاط الطبيعي. كسر الأواصر المزدوجة في جزيئات البوليمر ثم استخدام الشواغر المدارية لربط ذرات الكبريت، يجب التحكم بكمية الكبريت المضافة للحصول على العدد المطلوب من مناطق الترابط.

يقوم المُنتِج عادةً بتغيير عدد الروابط وذلك بالتحكم بكمية الكبريت المضافة إلى المطاط الساخن، فكلما ازداد الترابط المستعرض كلما ازداد المطاط صلادة وقوة. فمثلاً ان المطاط المستخدم في صناعة الأشرطة المطاطية يحتوي على (4%) كبريت في حين ان المطاط المستخدم في صناعة كرات البولينج (Bowling) يحتوي على (40%) كبريت. يفقد المطاط مرونته عند تعرضه للحرارة أو أشعة الشمس (أي بوجود طاقة تنشيط)، و بوجود الأوكسجين في الهواء، حيث سيعمل الأخير كعامل ترابط مما يؤدي تحوله إلى مادة صلادة قابلة للكسر. ولهذا السبب تضاف مواد مضادة للتأكسد الى المطاط قبل عملية القولبة لتحول دون ذلك. ومن الجدير بالذكر ان للزيوت تأثير ضار على المطاط لأنها تجعله ينتفخ مما يسهل نفاذ الأوكسجين إليه مؤدياً الى تدهوره.

14-1 قوى التجاذب في بوليمرات الترموبلاستيك (Attractive Forces in Thermoplastics Polymers)

إن الرابطة الوحيدة الموجودة بين جزيئات البوليمر من نوع الترموبلاستيك هي قوى فان دير فال (Van Der Waals Forces) و هي روابط ضعيفة لذلك تتمكن الجزيئات من الانزلاق فوق بعضها البعض عند تسخينها. لذا يمكن قولبة هذا النوع من اللدائن مرة أخرى لعدداً غير محدود بالتسخين ومن هنا جاءت التسمية بالترموبلاستيك.

أن لقوى الجذب لبعض بوليمرات الثرموبلاستيك قطبية مؤقتة فقط بينما في أنواع أخرى تكون جزيئات البوليمر دائمة القطبية، لذا تكون الأولى أضعف من الثانية وتلين عند درجات حرارية أقل.

1-14-1 القطبية المؤقتة (Temporary Polarity)

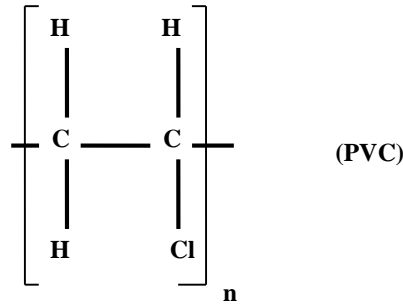
في هذا النوع تزداد قوى الجذب و تقوى الرابطة كلما كبر جزيء البوليمر. بالإمكان إضعاف قوى الجذب بين جزيئات هذا النوع من البوليمرات بواسطة التفرعات (Branches)، فتؤدي الأخيرة الى زيادة المسافة بين جزيئات البوليمر. وبالتحكم بحجم وعدد التفرعات يستطيع كيميائي البلمرة من إنتاج:

1. البولي أثيلين الكثير التفرع: وهو مادة مرنة وطبيعة ويستخدم في مجال واسع في صنع القناني التي تحتوي على الخردل (Mustard) وصابون غسيل الشعر (Shampoo) اللتين يستعمل فيهما الضغط لإخراج محتوياتهما.
2. البولي أثيلين الغير المتفرع: وهو أقوى نسبياً ويستعمل لصنع القناني التي تحتوي على المحاليل المبيضة (Bleach) للأغراض المنزلية.
3. البولي أثيلين متوسط التفرع: وخواصه وسط بين الاثنين، ويستخدم في صناعة جالونات المياه وسلال الغسيل.

ان أفضل طريقة للتعرف على المدى الذي يقوم به التفرع بمنع جزيئات البوليمر من الاقتراب من بعضها البعض هو بمقارنة الكثافة، فعلى سبيل المثال ان للبولي أثيلين المتفرع وزناً نوعياً مقداره (0.91) بالمقارنة مع النوع الغير المتفرع الذي يكون (0.96).

2-14-1 القطبية الدائمة (Permanent Polarity)

تمتلك الكثير من جزيئات بوليمرات الثرموبلاستيك قطبية دائمية. فمثلاً في البولي كلوريد الفينيل (PVC)، شكل (1-18)، تحل ذرة كلور محل ذرة الهيدروجين الأخف وزناً، على جانب واحد من جوانب السلسلة الرئيسية لبوليمر الأثيلين جاعلةً من ذلك الجانب قطباً لأن الشحنة الموجبة الأكبر ستجذب الاليكترونات مما يؤدي الى اكتسابه شحنةً سالبةً. بسبب ترابط جزيئات البوليمر القطبية بشدة أكبر من الجزيئات اللاقطبية، لذا فهي أكثر صلادةً وصلابة ودرجات حرارة ليونتها أعلى. ان الرابطة الوثيقة بين جزيئات البوليمر ستجعل قولبة البوليمرات القطبية صعبة في الغالب، لذا تضاف مادة خاملة تدعى بالملدن (Plasticizer) لزيادة لدونة البوليمرات، وبذلك يستطيع المنتج ان يتغلب على هذه الصعوبة.



شكل (18-1) جزيء البولي فينيل كلورايد (PVC) .

إن أحد الأمثلة الملفتة للنظر على اللاقطبية هو بوليمر التترا فلورو أثيلين والمعروف تجارياً بالتفلون، حيث يشبه هذا البوليمر البولي أثيلين من حيث التركيب. أن الفرق بين جزيئات هذين البوليمرين يعزى إلى إحلال ذرات الفلور محل كافة ذرات الهيدروجين. ويتميز التفلون بالإضافة الى كونه لا قطبي، بالرابطة الكبيرة جداً بين ذرات الكربون والفلور .

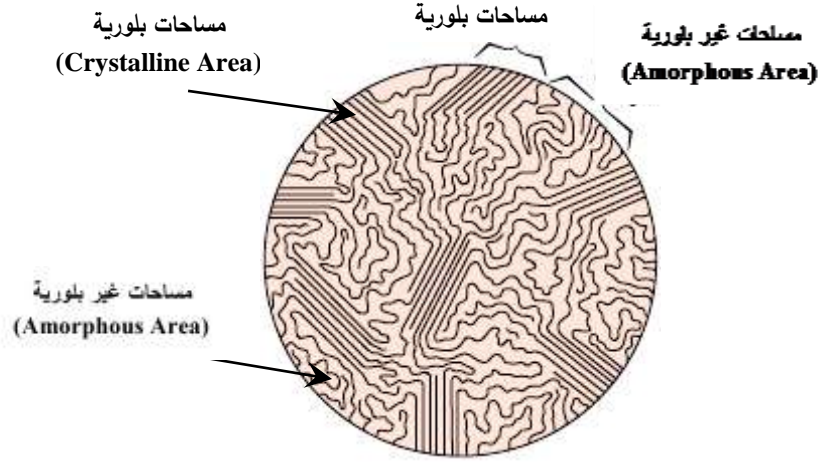
ان جزيئات هذا البوليمر تقاوم حتى تكوين الروابط المؤقتة مع المواد الأخرى، ولا يلتصق بها شيء، بمعنى آخر تنزلق جميع المواد بيسر فوق التفلون. إن أهم الاستعمالات المثيرة لهذا البوليمر هو في أكساء قاعات التزلج بدلاً من الجليد، وأواني القلي لتسهيل عملية تنظيفها. تمتلك هذه المادة مقاومة ضد التأثير بالمواد العضوية لذلك تستخدم في المختبرات كحشيات (Gaskets) و أنابيب توصيل للمذيبات العضوية. أما استخدامها في التطبيقات الطبية فهي تستخدم في ترقيع طبلة الأذن وفي صناعة الصمامات القلبية الاصطناعية. ونتيجة لما تمتلكه هذه المادة من خملاً كيميائياً، تكسى بعض عبوات تحضير العقاقير الطبية و الأدوية بطبقة من التفلون لمنعها من التلوث بأكاسيد المعادن.

ان البوليمرات المستخدمة في صناعة المواد اللاصقة يجب ان تمتلك درجة كبيرة من القطبية.

15-1 التبلور في المواد المتبلورة (Crystallization in Polymers)

ان معنى مصطلح التبلور في المواد المتبلورة له معنى مختلف عما هو معروف في الفلزات و الأملاح. فالفلزات والأملاح تتألف من مجموعة من البلورات تفصلها عن بعضها البعض الحدود الحبيبية (Grain Boundaries)، أما المواد المتبلورة فتتألف من مساحات غير بلورية (لا شكلية) مجاورة للمساحات البلورية، شكل (19-1). بالإضافة إلى ذلك يمكن لسلسلة البوليمر في المساحة المتبلورة أن تمتد إلى المساحة الغير المتبلورة ومن ثم إلى مساحة متبلورة أخرى. ومن الجدير بالذكر إن هنالك تشوهات في بلورة البوليمر تفوق بكثير عن تلك الموجودة في الفلزات والأملاح.

يعتقد فيزيائيو البلمرة بان معظم بلورات البوليمر الناتجة من تجمد المادة المنصهرة ستكون عبارة عن كريات صغيرة (Spherulites) ويمكن أن يعزى ذلك إلى الطبيعة اللزجة للكتلة السائلة والتي تحول دون تكون البلورات على الترتيب الشبكي المحدد للبلورات الجزيئية الأخرى.



شكل (1-19) جزء من كرية مادة متبلرة تظهر فيها مساحات متبلورة وغير متبلورة (لا شكلية)

عند تصويرنا للمواد المتبلرة باستخدام الضوء المستقطب (Polarized Light) سنلاحظ إنها تتكون من تركيب حبيبي كروي الشكل ويتراوح حجم كل حبيبة فيها من (1 - 100) مايكرون.

ونتيجة لكون الشكل البلوري هو أفضل أشكال المادة استقراراً في الطبيعة، لذلك ستؤدي المساحات المتبلورة في المواد المتبلرة إلى ازدياد صلابتها وقوتها بالإضافة إلى درجة حرارة ليونتها. وبما إن الذرات في البوليمر المتبلور ستكون محشوة بكفاءة أكبر عما في البوليمر غير المتبلور، لذا فهي أكثر عتمة. ويمكن ملاحظة ذلك التأثير عند مقارنة عبوة الشامبو النصف شفافة والمصنوعة من البولي أثيلين المتفرّع وذو درجة التبلور المنخفضة بعتمة القنينة المصنوعة من البولي أثيلين الغير المتفرّع والمستخدم لحفظ السائل المبييض.

ينعدم التبلور في البوليمرات من نوع الترموستك لذلك تستخدم الكثير منها في صنع الخلي بسبب شفافيتها المتألقة.

لا تمتلك بلورات البوليمر درجات انصهار محددة وهي بذلك تتصرف عكس الأنواع البلورية الأخرى من الفلزات والأملاح، ويعزى ذلك إلى كون سلاسل جزيئات البوليمر المكونة للبلورة تختلف كثيراً في الحجم. لذا ستصبح بعض مساحات البلورة أكثر حركةً من المساحات الأخرى

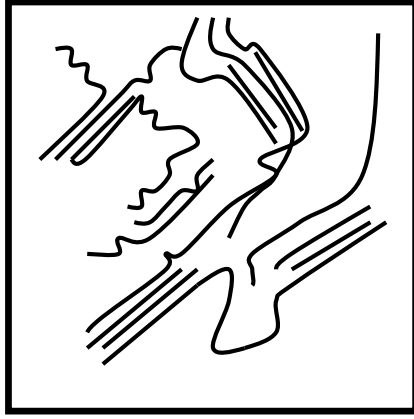
التي تكون ذات درجات حرارية منخفضة. فالأجزاء التي تتمكن من الحركة بدرجات حرارية منخفضة ستحصل على طاقة كافية تمكنها من بلوغ العشوائية، وبذلك تتلين الكتلة المتبلرة قبل أن تبلغ حالة السيولة.

أن قابلية جزيئات البوليمرات على تكوين البلورات تتغير تغيراً كبيراً اعتماداً على تركيبها. فمثلاً جزيئات البوليمر الطويلة السلسلة والمتناظرة ، لحدٍ ما، تتبلور بسهولة، بينما التي تكون سلسلتها غير منتظمة تكون صعبة التبلور.

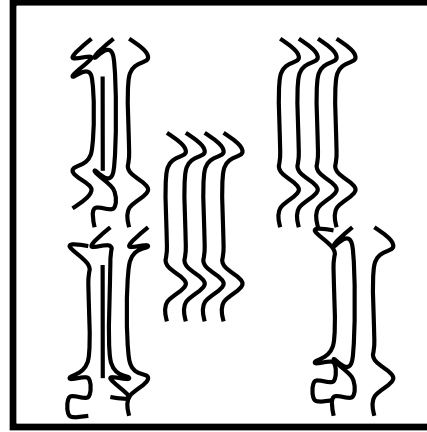
16-1 البوليمرات الموجهة (Oriented Polymers)

ان بعض بوليمرات الترموبلاستيك لا تكون أنماطاً بلورية في العادة ويُلجأ الى القولية الميكانيكية للحصول على درجة من التنظيم (Order). تحاول العديد من جزيئات بوليمرات الترموبلاستيك عند توترها نتيجةً لعملية السحب أو الضغط، ان تصف نفسها موازية لبعضها البعض بأسلوب بلوري بعض الشيء كما مبين في الشكل (1-20).

ان الدرجة العالية من الانتظام سينتج عنها دائماً نقصان في الطاقة المطلوبة لترابط الجزيئات والتي بدورها تزيد من الأستقرارية، لذا فان عملية القولية ستقوي هذه البوليمرات. يمكن أن نكسب العديد من المواد المتبلرة ذات النزعة للتبلور، متانة إضافية بواسطة توجيه مجاميع البلورات أثناء عملية القولية. حيث ستصطف مجاميع البلورات في هذه العملية بحيث تكون موازية لبعضها البعض. وبسبب كون الترابط التساهمي بين الذرات في السلسلة هو أقوى ترابط في المواد المتبلرة، فهو سيمنح قوة إضافية في اتجاه التوجيه. لذلك عندما يرغم النايلون بالخروج من فتحة ضيقة من القالب أثناء عملية بثقه ، سيمتلك الخيط المنبثق صلابة كبيرة جداً في اتجاه السحب.



أ

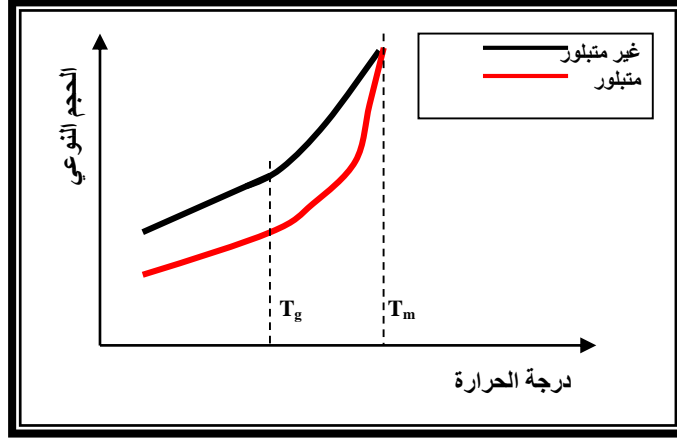


ب

شكل (1-20): أ) كتلة متبلرة متبلورة جزئياً تبين المجاميع المتبلورة وهي موجهة باتجاهات مختلفة؛ ب) نفس الكتلة المتبلورة نرى فيها مجاميع البلورات بعد عملية توجيهها بنفس الاتجاه بواسطة القولبة الميكانيكية.

17-1 درجات حرارة التحول (Transition Temperature)

هنالك درجتى حرارة مميزتان، ستظهران عند تسخين البوليمرات هما: درجة حرارة التحول الزجاجي (T_g)، ودرجة الانصهار (T_m) التي تُعرف بأنها الدرجة الحرارية التي تختفي عندها المكونات أو الكتل المتبلورة، وتعتمد كلا الدرجتان الحراريتين على تركيب و تاريخ البوليمر. يبقى الزجاج المنصهر لداً عندما يبرد الى درجة حرارة أقل من درجة الانصهار في مدى معين من درجات الحرارة، يتصلب بعدها عند بلوغه لدرجة حرارية معينة يطلق عليها درجة حرارة التحول (Transition Temperature). خلال عملية تبريد لمادة ثرموبلاستيكية غير متبلورة (لا شكلية) نلاحظ حدوث نفس هذه الظاهرة ولذلك يطلق عليها بدرجة حرارة التحول الزجاجي. ان هذه الخاصية يبينها الشكل (1-21). حيث نلاحظ فيه العلاقة بين الحجم النوعي (حجم غرام واحد) مع تغير درجة الحرارة. ونستطيع ان نلاحظ ان هنالك تقلص حاد عن درجة الانصهار اذا كانت المادة متبلورة. أما في حالة المادة المتبلورة غير متبلورة، فان الحجم يقل بسرعة أكبر ولفترة تكون فيها درجة الحرارة أقل من درجة حرارة الانصهار. يصبح حجم التقلص صغيراً عندما تكون درجة الحرارة أقل من درجة حرارة التحول الزجاجي.



شكل (1-21) درجة حرارة التحول الزجاجي لنوعين من البوليمرات، أحدهما متبلور والآخر غير متبلور.

ونستطيع كتابة العلاقة الرياضية التي تربط بين درجة حرارة التحول الزجاجي ودرجة الانصهار للمبلمرات المتبلورة بالشكل التالي:

$$0.5 T_m < T_g < 0.67 T_m$$

وتكون النسبة : $0.5 \approx \frac{T_g}{T_m}$ في حالة المبلمرات المتماثلة ، بينما تكون النسبة $0.67 \approx \frac{T_g}{T_m}$ في

حالة المبلمرات الغير متماثلة مثل البروبلين (Propylene).

ومن الجدير بالذكر ان إضافة الملدنات الى البوليمرات تؤدي الى تخفيض درجة التحول الزجاجي.

18-1 خواص البوليمرات عند درجات الحرارة المحيطة

(Properties of Polymers at Ambient Temperature)

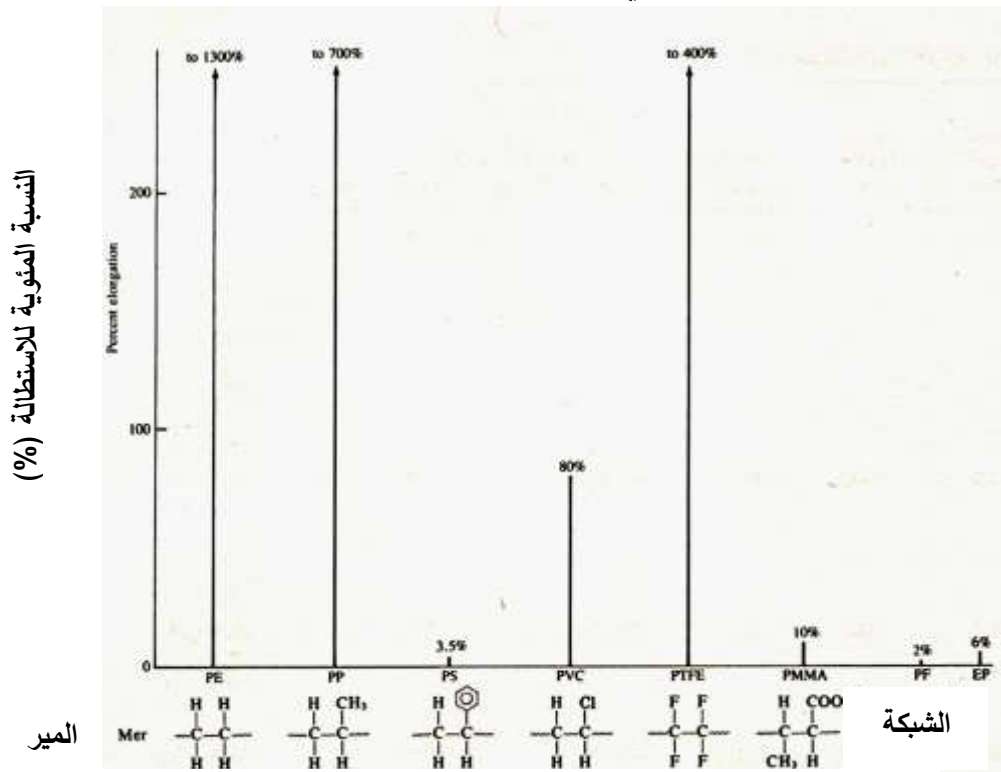
الجدولان (1-1) و (2-1) يبيان البنية الهيكلية والخواص المهمة للبوليمرات. ولتسهيل مناقشة الشكلين (1-22) و (1-23) الذين يوضحان الرسوم البيانية لإجهاد الشد و الاستطالة عند درجة حرارة (21°C) ، اللذان تم قياسهما في الاختبار خلال فترة زمنية قصيرة. الشكلين يوضحان كذلك تأثير استبدال ذرات الهيدروجين في البنية الأساسية للبولي أثيلين.

فعندما تُستبدل ذرة هيدروجين واحدة في المير بـ (CH₃) ، Cl ، بنزين ، أو مجموعة أكريليك ، فإن صلابة البوليمر ستزداد. ولكن عندما تُستبدل جميع ذرات الهيدروجين بذرات الفلور ، فإن قوى التجاذب بين الجزيئات ستتخفض ولا تتحسن صلابته.

لقد تم وضع بنيتين شبكيتين في الجدول (وهما الفوميلدهايد-فينول و الأيبوكسي) حتى تكون مصدر للمقارنة في الخواص. أن معظم المواد المتبلرة من نوع الترموبلاستيك تُظهر استطالة عالية عند درجة حرارة (21°C). ولكن في البوليمرات التي تمتلك مجاميع معقدة ستطلب درجات

حرارية أعلى لتُظهر السلوك المطولي (Ductile Behavior). أما المواد المتبلمرة من نوع الترموستك فهي بصورة عامة تبدي استطالة قليلة.

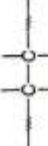

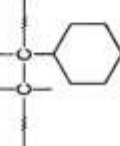
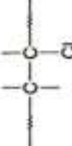

أن أعلى قيمة لمعامل المرونة يوجد في بنية بوليمرات الترموستك ذات البنية الشبكية، كما هو متوقع (لاحظ الجدول 1-2). انه من المهم ان نلاحظ انه حتى عند القيم العالية، لليوريا-ميلامين (Urea-Melamine) والذي معامل مرونته $(10.35 \times 10^3 \text{MPa})$ ، وهو أقل بكثير عن معامل المرونة للصلب الكربوني والذي يبلغ $(200 \times 10^3 \text{MPa})$. لذلك فمن المتوقع بان يحدث في اليوريا-ميلامين انحرافاً أكبر مما في الصلب عند تعرضهما لنفس الإجهاد؛ هذه الخاصية يجب ان تؤخذ بنظر الاعتبار في تصميم المركبات.



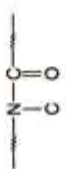


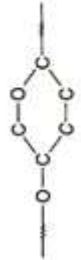
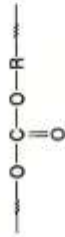
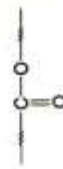
شكل (1-22) مدى النسبة المئوية للامتداد في حالة الشد لمجموعة مختارة من البوليمرات عند درجة حرارة الغرفة.

جدول (1-1) خواص بوليمرات الترموبلاستيك.

Table 9.5 PROPERTIES OF THERMOPLASTIC POLYMERS

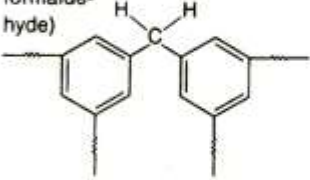
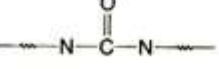
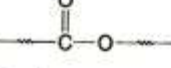
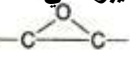
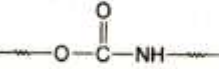
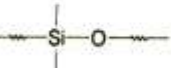
Name and Structure ^a	Use, per- cent	Price, ^b dollars/lb	Tensile Strength, ^c psi	Percent Elonga- tion	Rockwell Hardness, R	Impact, ^d ft-lb	Modulus, ^e psi x 10 ³	Specific Gravity	Coefficient of Expansion, (°F) ⁻¹ x 10 ⁻⁶ [(°C) ⁻¹ x 10 ⁻⁶]	Heat Dis- tortion, ^f °F (°C)	Burning Rate, ^g in./min	Typical Applica- tions
Polyethylene High density Low density 	13 19	0.32 to 0.38 0.30 to 0.41	4,000 2,000	15 to 100 90 to 800	40 10	1 to 12 16	120 25	0.95 0.92	70 (120) 100 (180)	120 (49)	1 1	Clear sheet, Bottles
Polypropylene 	11	0.35 to 0.39	5,000	10 to 700	90	1 to 11	200	0.91	50 (90)	150 (66)	1	Sheet, pipe, Coverings
Polystyrene 	9	0.37 to 0.42	7,000	1 to 2	75	0.3	450	1.05	38 (68.5)	180 (82)	1	Containers, foams
Polyvinylchloride (rigid) 	15	0.24 to 0.30	6,000	2 to 30	110	1	400	1.40	30 (54)	150 (66)	<1	Floors, fabrics
Polytetrafluoroethylene (Teflon) 	<1	3.00	2,500	100 to 350	70	4	60	2.13	55 (99)	270 (132)	0	Chemical ware, seals, bearings, gaskets

تكملة للجداول (1-1)

ABS, acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer	3	0.55	4,000 to 7,000	20 to 80	95	1 to 10	300	1.06	50 (90)	210 (99)	1	Luggage, telephones
Polyamides (6/6 nylon)	1	0.90	11,800	60	118	1	410	1.10	55 (90)	220 (104)	Low	Fabric, rope, gears, machine parts
												
Acrylics (Lucite)	1	0.55	8,000	5	130	0.5	420	1.19	40 (72)	200 (93)	1	Windows
												
Acetals	<1	0.70	10,000	50	120	2	520	1.41	44 (79)	255 (124)	1	Hardware, gears,
												
Cellulotics	<1	0.55 to 0.70	2,000 to 8,000	5 to 40	50 to 115	2 to 8	500 to 4,000	1.25	75 (135)	115 to 190 (46 to 86)	1.4	Fibers, films, coatings, explosives
												
Polycarbonates	<1	1.10	9,000	110	118	14	350	1.2	25 (45)	275 (135)	<1	Machine parts, propellers
												
Polyesters	2	0.45	8,000	300	117	1	340	1.3	33 (60)	130 (56)	Low	Magnetic tape, fibers, films
												

* A continuing bond is indicated by R may be any complex molecule. In general, hydrogen atoms are not shown.
 † 1984 prices for PE, PP, PS, and PVC. Remainder approximated from 1980 prices.
 ‡ Multiply by 6.9×10^{-4} to obtain MN/m² (MPa) or by 7.03×10^{-4} to obtain kg/mm².
 § Multiply by 0.138 to obtain kg-m.
 ¶ Loaded at 264 psi, 1.82 MN/m² (MPa), gives severe deflection.
 †† Multiply by 2.54 to obtain cm/min.

جدول (1-2) خواص بوليمرات الترموستيك.

Name and Structure ^a	Use, per-cent	Price, ^b dollars/lb	Tensile Strength, ^c psi	Percent Elonga-tion	Rockwell Hardness, R
Phenolics (الفينولات-phenol-formaldehyde) 	6	0.35	7,500	0	125
Urea-melamine (اليوريا-ميلامين) 	4	0.50	7,000	0	115
Polyesters (البولي بيستر) 	3	0.35	4,000	0	100
Epoxies (الايوكسي) 	1	0.63	10,000	0	90
Urethanes (اليوريثين) 	4	—	5,000	—	—
Silicones (السليكون) 	<1	1.35	[1,000] 3,500	[400] 0	89

Properties are for glass-filled silicone.

^a A continuing bond is indicated by —. R may be any complex molecule. In general, hydrogen atoms are not shown.

^b 1984 prices approximated from 1980 values.

^c Multiply by 6.9×10^{-3} to obtain MN/m² (MPa) or by 7.03×10^{-4} to obtain kg/mm².

^d Multiply by 0.138 to obtain kg-m.

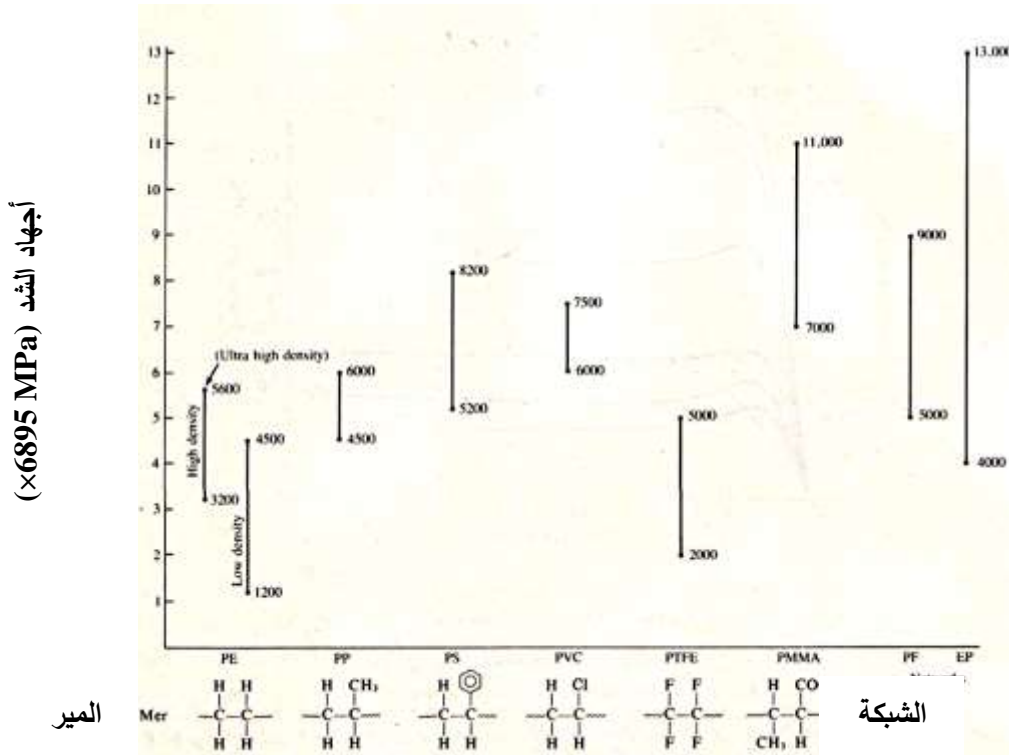
^e Loaded at 264 psi 1.62 MN/m² (MPa).

^f Multiply by 2.54 to obtain cm/min.

تكملة للجدول (2-1)

Impact, ^d izod, ft-lb	Modulus, ^e psi × 10 ³	Specific Gravity	Coefficient of Expansion, (°F) ⁻¹ × 10 ⁻⁶ [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶]	Heat Dis- tortion, ^g °F (°C)	Burning Rate, ^f in./min	Typical Applica- tions
0.3	1,000	1.4	45 (81)	300 (149)	<1	Electrical equipment
0.3	1,500	1.5	20 (36)	265 (129)	0	Dishes, laminates
0.4	1,000	1.1	42 (75.5)	350 (177)	1.4	Fiberglass composite, coatings
0.8	1,000	1.1	40 (72)	350 (177)	1	Adhesives, fiberglass composite, coatings
—	—	1.2	32 (57.5)	190 (88)	<1	Sheet, tubing, foam, elastomers, fibers
0.3	1,200	[1.25] 1.75	[280 (250)] 20 (36)	360 to 900 (177 to 482)	<1	Gaskets, adhesives, elastomers

البيانات بين الأقواس هي للإستمرات



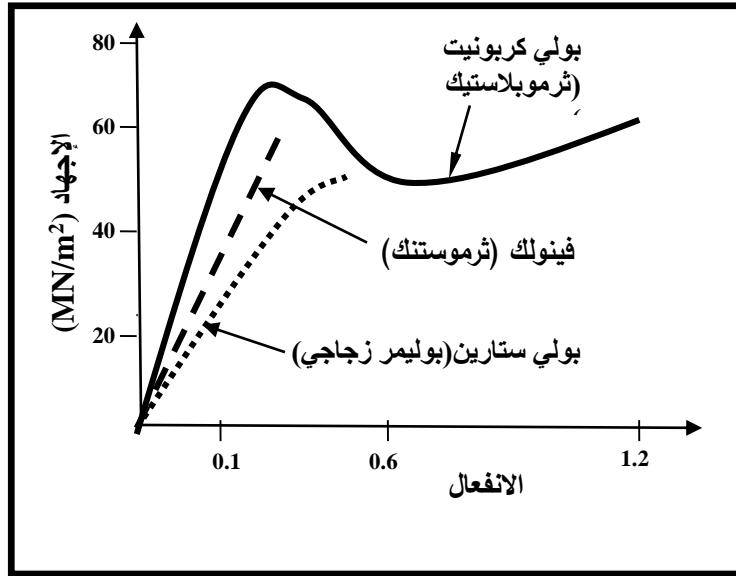
شكل (1-23) مدى إجهاد الشد لمجموعة مختارة من البوليمرات عند درجة حرارة الغرفة.

19-1 اختبار الشد لللدائن (Tensile Test of Polymers)

يطبق اختبار الشد لللدائن بطريقة مشابهة للمعادن وذلك لمعرفة المقاومة للحمل الأستاتيكي واللدونة. ونتيجةً لاعتماد الخواص المرنة للزجة للبوليمرات على الوقت بصورة كبيرة ، فان القراءات المحصلة من اختبار الشد لا نستطيع ان نطبقها في التصميم لأجزاء البوليمر بصورة موثوق بها كما في المعادن، بل يجب ان تُكَبَّر أو تستبدل بالكامل بقراءات الزحف (Creep) ، والتي تعطي التغير في الخواص مع الوقت تحت تأثير الحمل. وبالرغم من ذلك، تتوفر قراءات تعطي معلومات لمعظم البوليمرات وتعطي معلومات مفيدة عن المقاومة لتحميل لفترة قصيرة ومقياس كبير لخصائص التشوهات.

هنالك وصف لاختبار الشد لللدائن موجود في طرق الاختبار القياسية الأمريكية (ASTM D638). من الممكن ان تكون عينة الاختبار بأشكال مختلفة، فقد تكون على شكل ليفة (Fibre) أو صفيحة أو رقائق أو أنبوب أو عمود. إن طرق الاختبار القياسية الأمريكية (ASTM) تحدد أبعاداً خاصة لعينات الاختبار، لكن في التجارب العملية يمكن أن نختار أي حجم مناسب للمنتج أو لعملية القولبة.

تعتبر قراءات اختبار الشد في المعادن غير حساسة نسبياً الى معدل سرعة السحب (الشد)، بينما اللدائن تكون أكثر حساسية.



شكل (24-1) مخطط الإجهاد-الانفعال لبعض المواد المتبلرة.

من الممكن ان يأخذ مخطط الإجهاد-الانفعال للبوليمرات أشكالاً عديدة كما مبين في الشكل (1-24). فالبوليمر الزجاجي يمكن ان يظهر منطقة كبيرة للمرونة، ومنطقة صغيرة من المطولية كما في البولي ستارين (Polystyrene). تظهر بوليمرات الثرموستات قليلاً من التشوه اللدن، وتتصرف بمرونة غالباً الى غاية إجهاد الكسر (مثل راتنجات الفينول). العديد من البوليمرات الجزئية التبلور أو الجزئية الغير متبلورة، تتصف بظاهرة السحب-البارد أو التخصّر (Necking).

في المنطقة التي تكون فيها الإجهادات منخفضة ستكون العلاقة خطية وميل الخط يمثل معامل المرونة. إن المنحني سيكون غير مستقيماً تماماً، حيث سيقبل الميل كلما زاد الإجهاد نتيجة للتأثير المرن اللزج وسيحدث الزحف أثناء إجراء الاختبار.

20-1 السلوك الميكانيكي للبوليمرات

(Mechanical Behavior of Polymers)

ان السلوك العام لشكل المنحني لبوليمر يتعرض إلى إجهادات مختلفة يمكن تمثيله بنمط هذه النماذج: حيث يتألف من ثلاثة مناطق رئيسية هي:

أ. منطقة الاستجابة المرنة (Elastic Response)

إن تسليط أي حمل يؤدي إلى حدوث استطالة للروابط التساهمية ضمن سلاسل البوليمر. ويمكن تمثيل السلوك الميكانيكي في هذه المنطقة بنابض. حيث سيسطيل النابض (الذي

يُمثّل هنا أوامر الكربون-الكربون) حالما يتم تسليط الحمل عليه، ويرجع إلى طوله الأصلي عندما يزال الحمل.

ب. منطقة الاستجابة المرنة اللزجة (Viscoelastic Response) تكون جزيئات البوليمر ملتفة (Coiled) عادةً، في المناطق غير المتبلورة (اللاشكالية) (Amorphous). عندما يتعرض البوليمر للإجهاد ستحاول هذه الجزيئات ان تستقيم وتقاوم بتأثير اللاننتظام للحركة الحرارية للذرات. سيحدث تمدد بطيء للسلاسل الطويلة للجزيئات في فترة زمنية معينة، وعند إزالة الحمل فأنها ستلتف مرة أخرى وببطيء أيضاً راجعاً إلى حالتها المستقرة. إن النظام الميكانيكي الذي يصف هذه المنطقة هو نظام النابض والمخمّد المربوطين على التوازي. فعند تسليط الحمل فان المقاومة اللزجة للمخمّد هي التي ستقاوم القوة. يحدث بعض الانسياب مع مرور الزمن، وباستطالة المنظومة يبدأ النابض بتحمل جزء من الحمل. في نهاية الأمر سوف يتحمّل النابض الحمل كله وسيحصل توازن في التمدد. عندما يتم إزالة الحمل الخارجي من على المنظومة، سترجع ببطيء إلى طولها الأصلي. أن مقدار فتح المنظومة هو دالة لثابت النابض ولزوجية مائع المخمّد. إن خصائص الوقت لكي تستعيد هذه المنظومة (37%) من طولها الحقيقي بعد إزالة الحمل يعرف بوقت الاسترخاء.

ج. منطقة الانسياب اللزج (Viscous Flow) في بوليمرات الترموبلاستيك، يمكن للجزيئات أن تنزلق فوق بعضها البعض إذا كان التشابك الجزيئي ليس كبيراً في العدد. إن مثل هذه الحركة تكون غير عكسية وتسبب تشوه دائم.

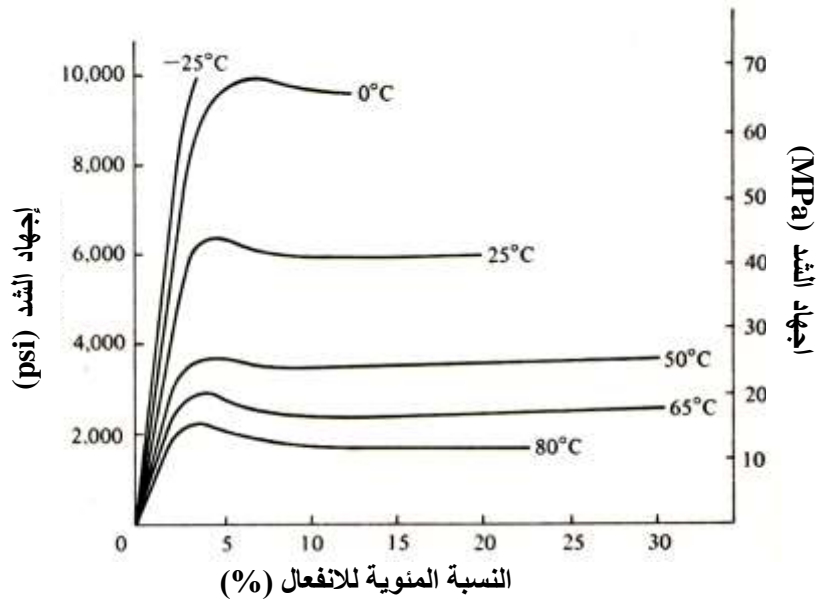
هذا الانسياب يشبه عملية فتح بطيئة لمخمّد تحت تأثير حمل مسلط. أن استطالة النموذج الكلية تحت تأثير الحمل ستمثل مجموع الاستطالات المستقلة للمناطق الثلاثة في النموذج. إن شكل المنحني الناتج عن الاستطالة-الوقت عند التحميل الثابت (منحني الزحف) له نفس شكل قراءات الزحف العملية. إن الرجوع إلى الأبعاد الأصلية عند رفع التحميل يحدث نتيجةً للرجوع الآني للانفعال المرن والاستعادة البطيئة للانفعال المرن اللزج.

21-1 تأثير الزمن ودرجة الحرارة

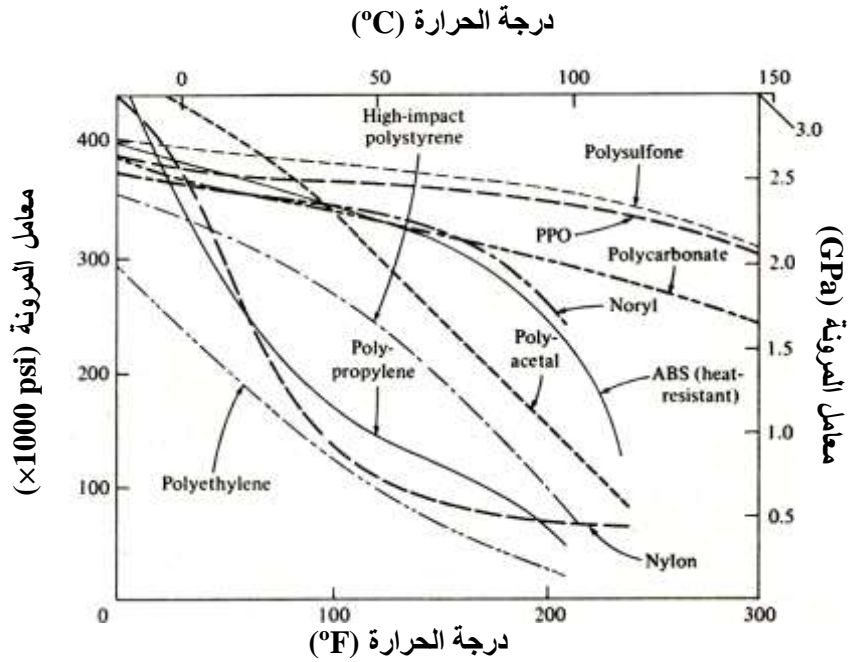
(Effect of Time and Temperature)

عند إجراء اختبار الشد على عينة من أسيئات السليلوز عند درجات حرارية مختلفة (شكل 1-25)، فإننا سنجد الصلابة العالية والسلوك الهش (Brittle) عند درجات الحرارة المنخفضة، والصلابة المنخفضة والسلوك المطولي (Ductile) عند درجات الحرارة العالية. ان تغير معامل المرونة مع تغير درجات الحرارة لمجموعة من البوليمرات يمكن ان نلاحظها في الشكل (1-26). ربما نستطيع تمثيل هذا السلوك والذي هو الشائع في بوليمرات الترموبلاستيك، بالرسم التخطيطي

المبين في الشكل (1-27). ان الخصائص عند درجات الحرارة المنخفضة ولبعض المواد المتبلرة، يكون فيها السلوك زجاجياً وتخضع لقانون هوك (يتناسب الإجهاد مع الانفعال تناسباً طردياً وبعلاقة خطية). عند الاقتراب من درجات الحرارة العالية، يتم التغلب على الروابط بين الجزيئات بواسطة التهيج الحراري (Thermal Agitation) ويصبح الانسياب لزجاً. يعتمد تأثير واستجابة البوليمرات عند تعرضها للإجهادات، اعتماداً كبيراً على درجة الحرارة وفي مدى يفوق كثيراً عما يحدث في المعادن والسيراميك. فإذا كانت المادة المتبلرة من نوع ثرموبلاستيك، سنلاحظ ان هنالك أربعة مناطق ممكن تحديدها (مناطق رئيسية للسلوك المرن اللزج) وهي:



شكل (1-25) تأثير درجة الحرارة على منحنى الإجهاد-الانفعال لأسياتات السليلوز.



شكل (1-26) تأثير درجة الحرارة على خواص البوليمرات المختلفة.

أ. المنطقة الزجاجية (Glassy Region)

تكون حركة الجزيئات قليلة في درجات الحرارة المنخفضة، حيث تكون مقيدة بالحركة الاهتزازية للذرات المنفردة خلال الجزيء. يكون جزيء البوليمر صلب (Stiff) ومعامل المرونة لأغلب اللدائن الزجاجية هو في حدود $(E = 3 - 5 \times 10^9 \text{ N/m}^2)$. ان المنطقة الثانية ستؤثر تأثيراً كبيراً على معامل المرونة وفي الكثير من البوليمرات، مما يؤدي الى حدوث تغير حاد في قيمة المعامل ضمن مديات صغيرة لدرجة الحرارة.

ب. المنطقة الانتقالية (Transition Region)

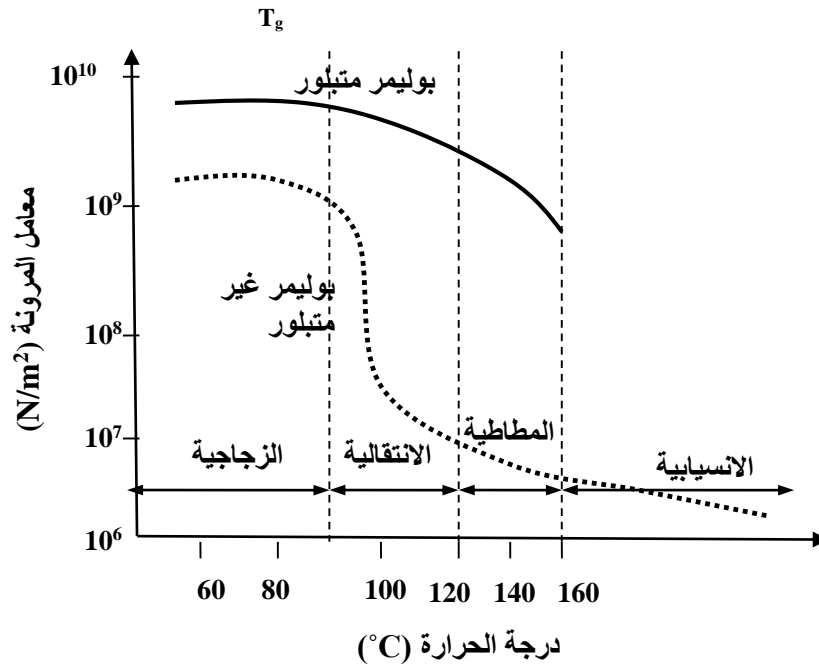
عندما تزداد درجة الحرارة، يزداد معدل الاهتزازات وتبدأ عندها الحركة لمجموعة من الذرات. ان هذا الانتقال إلى مقياس الحركة الكبيرة، يحدد درجة حرارة التحول الزجاجي عند التسخين. في هذه المنطقة، ينخفض معامل المرونة بشدة ويعتمد اعتماداً كبيراً على درجة الحرارة. الخواص الميكانيكية للبوليمر في هذا المدى من درجة الحرارة في حالة بحيث ان هذه المنطقة يشار إليها بالمنطقة الجلدية (Leathery Region).

ج. منطقة السلوك المطاطي (Rubbery Behavior Region)

يسبب المدى الكبير من التفاف الجزيئات (Coiling)، تمدد كبير ومطاطية تحدث بطواعية في درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التحول الزجاجي (T_g). في هذه المنطقة ستكون قيمة معامل المرونة في حدود ($1 - 10 \times 10^6 \text{ N/m}^2$). عندما تحتوي المادة المتبلرة على روابط مستعرضة، فان هذه المنطقة ستستمر حتى أثناء زيادة الحرارة الى ان تبدأ بالتحلل الكيميائي (Decomposition).

د. المنطقة الانسيابية (Flow Region)

عندما تزداد درجة الحرارة فان حركة الجزيئات تحدث بسرعة أكبر ويصبح تأثير التفاف السلاسل أقل تأثيراً مما يؤدي الى السلوك المائي. هذا السلوك بصورة عامة يمكن ان نغيره تغييراً كبيراً عند زيادة تعقيد كيميائية البوليمر.

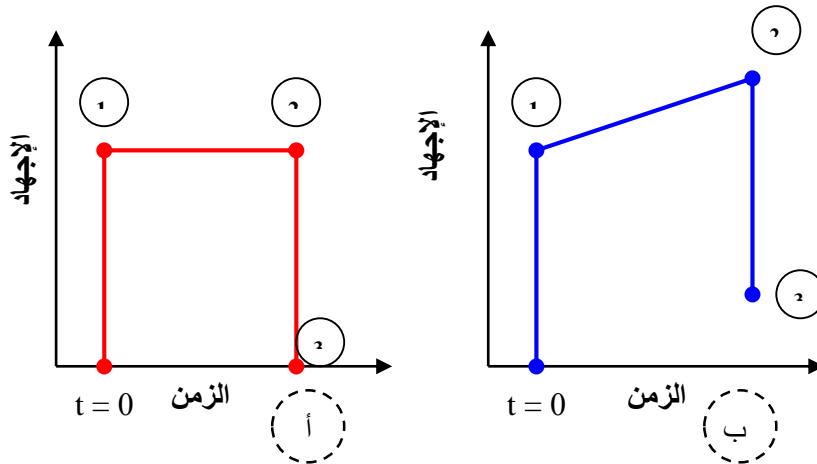


شكل (1-27) تغير معامل المرونة للبوليمر مع تغير درجات الحرارة.

ان المصطلح الذي يصف العلاقة التي تربط بين الزمن-الانفعال-درجة الحرارة في البوليمرات هو المرونة اللزجة. ان العلاقة ستكون تركيبية من خصائص المرونة والانسياب اللزج وهذه هي ليست المرة الأولى التي نقابل بها هذه الظاهرة فهي موجودة في لزوجة الزجاج وكذلك عند درجة حرارة التحول الزجاجي.

عند تسليط الحمل على المواد الصلبة المثالية ضمن المنطقة المرنة، فإننا سنحصل على النتائج المبينة في الشكل (1-28 أ). فعندما يسلب الإجهاد عند الزمن ($t = 0$)، فإن الانفعال المقابل سيحدث عند النقطة (1). ان مقدار هذا الانفعال ستعتمد على قيمتي الإجهاد ومعامل المرونة (الانفعال = الإجهاد/معامل المرونة). سيبقى الانفعال ثابتاً مع الزمن (النقطة 2). وعندما يزال الحمل فإن جميع الانفعال المرن سيستعاد (Recovered) (النقطة 3). ان الصلب الكربوني على سبيل المثال سوف يبدي مثل هذا السلوك عند درجة حرارة الغرفة دون ان يتأثر فترة تسليط الحمل.

الآن سنتناول البوليمرات التي ربما سيحدث فيها بعض الانسياب المرن اللزج عند درجة حرارة الغرفة (شكل 1-28 ب). فعند التحميل ($t = 0$)، فإن الانفعال سيزداد الى النقطة (1). ستتفاعل المادة بشكل مرن بسبب كون التحميل صغيراً وسيستطيع النموذج المختبر ان يعود بالانفعال الى الصفر في حالة إزالة الحمل. ولكن مع مرور الزمن سيزداد الانفعال الى النقطة (2) حتى لو كان الحمل ثابتاً. وعند إزالة



شكل (1-28) عندما تُحمّل المادة في الحالة المرنة، ربما ترجع الى شكلها الأصلي حيث الانفعال صفراً كما في الحالة (أ) أو ربما تظهر سلوكاً مرناً لزجاً مع تبقي بعض الانفعال كما في الشكل (ب).

الحمل هذه المرة، سيحصل بعض التشوه الدائم أو اللدن (النقطة 3).

سوف لن نشاهد هذه الظاهرة أبداً اذا لم نبقي العينة تحت تأثير الحمل لفترة طويلة. نعتقد أن الاستجابة المرنة للزجة تعكس قابلية المواد لتعديل الإجهاد المسلط عليها. هذا فيما إذا أبقينا الانفعال ثابتاً على المادة، فإن الإجهاد سينخفض مع مرور الزمن. هنالك عدد من البوليمرات يبدون هبوطاً في الإجهاد بشكل أسي وحسب المعادلة التالية:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$$

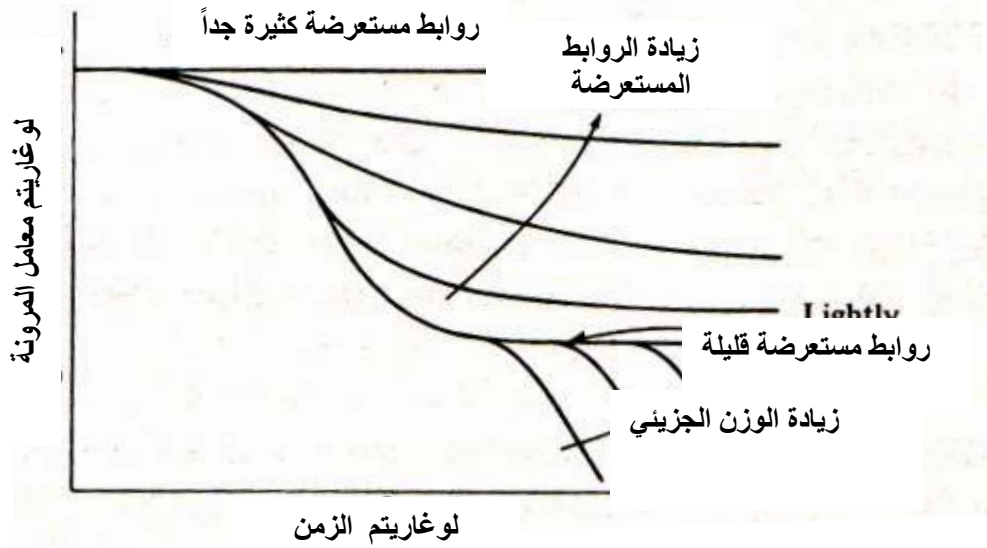
حيث أن:

σ : الإجهاد عند الزمن (t)

σ_0 : الإجهاد عند الزمن (0)

λ : زمن الاسترخاء، وهو الزمن اللازم لتخفيض الإجهاد الى (1/e) من قيمته الأصلية.

في البوليمرات المشتركة (Copolymers) والتي لها مقاطع طويلة من الجزيئات والتي تتصرف كلُّ على حدة كبوليمر منفرد، سنلاحظ في هذه الحالة ان هنالك منطقتين متميزتين لانخفاض المعامل عند درجة الحرارة المقابلة لدرجة حرارة التحول الزجاجي (T_g) لكل من المكونات التي تتألف منها المواد المتبلرة المشتركة. بالطبع ان البوليمرات البلورية (Crystalline) لها درجة انتظام اكبر في التغيير الذي يحدث مع درجة الحرارة كما مبين في الشكل (1-25)، ولا تُظهر تغيراً مفاجئاً مصاحباً للانتقال الزجاجي. ان معامل المرونة في البوليمرات البلورية هو مشابه الى البوليمرات الزجاجية عند درجات الحرارة الواطئة ويقل بالتدرج بزيادة درجة الحرارة مع عدم وجود تغير في درجة حرارة التحول الزجاجي (T_g). البوليمرات الجزيئية غير البلورية (اللاشكالية) و الجزيئية التبلور، يحدث فيها انخفاض أقل في المعامل عند درجة حرارة التحول الزجاجي (T_g) مما في البوليمرات الغير المتبلورة (اللاشكالية): كلما زادت نسبة التبلور كلما قل وأصبح أكثر تدرجاً في درجة حرارة التحول الزجاجي (T_g).



شكل (1-29) تأثير الروابط المستعرضة على معامل المرونة.

أما تأثير الروابط المستعرضة على الخواص العامة للبوليمرات فيمكن ملاحظتها في الشكل (1-29). فكلما ازدادت الروابط المستعرضة، فإن المديان الانسيابي والمطاطي سيميلان الى الاختفاء. في حالة المطاط الطبيعي فان هنالك مرونة عظيمة مع فقط نسبة مئوية قليلة من الترابط المستعرض، لكن زيادة الترابط المستعرض الى (70-80%) من المتوفر، فإننا سنحصل على مطاط صلد وهش كالذي يستعمل في صناعة المشط وبعض البطاريات.

22-1 إعداد البوليمرات للاستعمال (Polymer Processing)

تتألف صناعة اللدائن من المُصنِّعين الذين ينتجون الراتنجات والمواد الكيماوية والمُصنِّعون (Fabricators). ينتج المصنِّعون المواد الخام، والتي تتضمن المساحيق، الحبيبات (Granular)، السوائل، والأشكال القياسية مثل الصفائح، القضبان، الأنابيب، الأسطوانات واللدائن الطبقي (Laminates). يقوم المُصنِّع بتجهيز المنتج لتوزيعه على المصانع والمستهلكين. في أغلب الحالات، من الضروري ان نخلط ونُحضّر المواد الخام للإنتاج النهائي.

يُطلق على هذه الخطوة بالتركيب (Compounding) أو التشكيل المُسبق (Preforming). وتتألف عملية إعداد البوليمرات للاستخدام من سلسلة إضافات لمواد تُضاف الى المواد المتبلّرة لزيادة استغلالها بالطريقة الأمثل كما مبين في الجدول (1-3). من النادر ان تستعمل معظم البوليمرات كمواد راتنجية عضوية صرفة، بل إنها تُعدّل و تُركّب مع مواد مختلفة تُضاف إليها للحصول على الخصائص المطلوبة و المرغوبة لاستعمالات معينة. وتسمى عملية اختيار المواد المضافة هذه و دمجها في المبلر بالتركيب (Compounding). يتعرض الخليط الناتج، بعد

إجراء عملية التركيب، لعمليات مختلفة من التشكيل و الانتهاء بالشكل المرغوب فيه. وفيما يلي عرضاً لبعض هذه العمليات:

جدول رقم (1-3) الإضافات الشائعة لللدائن.

المادة المُضافة	أسماء المواد والغرض من إضافتها
الحشوات (Fillers)	لتقليل الكلفة أو لزيادة الصلابة. وتشمل دقيق الخشب، الكوارتز، الحجر الجيري، القطن، المساحيق المعدنية، الجرافيت، الألياف، والياق الخرق.
داعمة (Reinforcements)	للصلابة الفيزيائية. وتشمل السايزل* (Sisal)، نبتة الجوتة (Jute)، الزجاج، الجرافيت، الشعيرات (Whiskers)، السيراميك، النايلون، القطن والألياف.
مانعات اللهب (Flame Retardants)	تضاف لتضعف قابلية الاحتراق للمنتج. وتشمل أيستر الفوسفات (Phosphate Ester) ومركبات الأنتمون.
المثبتات (Stabilizer)	تضاف للحفاظ على اللدائن من الأكسدة أو التدهور أثناء الاستخدام. صابون الزنك يضاف الى الفينيل و الفينول (Phenols) الى السترين.
مانع الشحنه (Antistatic)	تضاف لمنع تجمع الشحنه الكهربائية على المسحاق خلال العمليات وعندما تستدعي الضرورة يضاف أمين ,
الصبغات (Colorants)	تضاف لتحسن منظر المنتج للمستهلك. تضاف الألوان وتخلط مع الراتنج أو تكون سائلة فتقاس كميات معينة وتخلط البلاستيك في مكان الحقن و البثق. الألوان متوفرة كصبغات عضوية وغير عضوية و الملونات قد تكون مواد صلبة او سائلة. العديد من الرتجات يتم تلويثها مسبقاً.
المزلاقات (Lubricants)	تضاف لتحسن العملية بتسهيلها لعملية التدفق في القالب. وتشمل الشمع ، الزنك، أستيرات الكالسيوم (Calcium Stearates)
الملدنات (Plasticizer)	تضاف لتحسين المرونة والشكل النهائي. الفينيل يعتبر من المواد القسيقة جداً لذلك تضاف إليه الأفتاليت (Phthalate).
مواد الحماية من الأشعة فوق البنفسجية (Ultraviolet Protector)	تضاف الى الفينيل، الستيرين، البولي يستر، الألياف الزجاجية لتحسين عمر المنتج المعرض لأشعة الشمس. أسود الكربون هو أحد الأمثلة على المواد الواقية.

* الألياف البيضاء التي تُصنع منها الحبال

1) التركيب (Compounding)

وهي عملية يتم فيها تعديل خواص المبلمر بواسطة خلطه مع مكونات أخرى مثل راتنج المبلمرات، الملدنات، الحشوات، عوامل التقوية، المثبتات المختلفة، المصبغات، المزلاقات، مانعات اللهب وعوامل التقاطع الجزيئي. وتستخدم هذه العملية عندما تكون هنالك حاجة الى مبلمرات جديدة تمتلك مواصفات خاصة.

(2) تهجين المبلمرات (Blending of Polymers)

وهي عملية تهجين أو توليف البوليمرات بواسطة خلط أو مفاعلة متبلمرين أو أكثر من المتبلمرات الراتنجية (الرزنية)، للحصول على ناتج له خصائص مُحسّنة، وخاصةً لمقاومة الصدمات. عندما تكون المبلمرات متوافقة مع بعضها البعض فإنها تكون محلولاً جامداً. تقع درجة حرارة التحول الزجاجي للنظام الناتج بين درجتي التحول إذا كانا المبلمرين متجانسين. أما إذا كانا مختلفين في طبيعتهما الكيماوية بمقدار كبير، فإن درجة حرارة التحول الزجاجي للمبلمر الناتج ستكون أقل من درجتي التحول الزجاجي للمبلمرين المتوافقين. من الأمثلة على المبلمرات المهجنة الغير المتجانسة هي المبلمرات الزجاجية-الهشة ذات الأهمية الصناعية مثل مزج البولي ستارين مع المطاط لإعطاء نظام يتميز بمتانة كبيرة ومقاومة عالية للصدمات.

(3) المُلدّنات (Plasticizer)

يعتبر التبلور في الكثير من الراتنجات الاصطناعية أمراً غير مرغوب فيه دائماً، لأنه يُصعب قولبتها و يفقدها الشفافية، نتيجةً لتقريب جزيئات البوليمر من بعضها البعض. لهذه الأسباب تضاف مواد ذات أوزان جزيئية منخفضة (300 تقريباً) إلى الكتلة المتبلرة قبل قولبتها، يطلق عليها المُلدّنات (Plasticizer). فبواسطة انتشار هذه المادة بين جزيئات الكتلة المتبلرة فستجعلها ليّنة وطبعية وتمنعها من التبلور. ان المُلدّنات ستسمح لجزيئات البوليمر الطويلة من التحرك بسهولة فوق بعضها البعض عند تعرضها للإجهاد. يمكن تشبيه هذه العملية بإضافة الماء إلى الطين لجعله أكثر لدونة و تسهيل قولبته. فالملدّن يخفض من درجة حرارة التحول الزجاجي (T_g) للمبلمرات اللاشكالية (الغير البلورية) ويقلل كذلك من درجة التبلور للمبلمرات المتبلورة. ان كمية المُلدّنات المضافة تعمل على ضبط الخواص النهائية للمواد المتبلرة. في العديد من الحالات فان المواد التي تستخدم كملدّنات لها درجة غليان عالية وتكون مواد عضوية. فعلى سبيل المثال من الممكن ان نزيد من سهولة حركة السلاسل بواسطة استخدام البوليمرات المشتركة وذلك عن طريق استخدام بوليمر يمتلك جزيئات كبيرة، وهذا يؤدي الى توسيع المسافة بين السلاسل، بالتصرف بطريقة مشابهة لإضافة المُلدّنات المزلقة.

لقد أُستخدم الكافور (Camphor) كمادة ملدنة بإضافتها إلى السليلويد (Celluloid) المُصنع من النتروسيليلوز (وهي مادة بلورية في العادة)، والذي استخدم بصورة واسعة في صناعة الأفلام السينمائية ولكن لكونه مادةً شديدة الاشتعال، تم استبداله اليوم بأسيتات السيليلوز لأنه أكثر أماناً.

هنالك ثلاثة أنواع من المواد التي تستخدم كملدّنات وهي:

1. الزيوت النباتية
2. مواد كيميائية موميرية ذات درجة غليان عالية
3. بوليمرات راتنجية ذات وزن جزيئي منخفض

أن احد أهم عيوب استخدام اللدائن هو انتشارها خلال الكتلة المتبلرة وتبخرها مما يجعلها غير طيعة، وبمرور الزمن ستؤدي الى تصدع المادة المتبلرة. عندما يتم إضافة كميات كبيرة من اللدن إلى الكتلة المتبلرة، يؤدي ذلك إلى ان يكون التآصر بين الجزيئات الصغيرة فقط مما يجعل المادة المتبلرة سائلة.

(4) الحشوات (Fillers)

هنالك نسبة عالية من اللدائن تُصنع بحشوات، فهذه المواد تزيد من صلابة ومتانة المادة وتُحسن من استقرارية أشكالها وتقلل من تكاليف إنتاجها. أن ميكانيكية

جدول (1-4) المواد المستخدمة كحشوات وتأثيراتها.

التأثير	الحشوة (Filler)
يزيد من الصلابة لكن له تأثير معاكس على امتصاص الرطوبة	دقيق الخشب (Wood Flour)
يقلل من الصلابة والجماعة ويزيد من درجة حرارة التشوه الحراري ويجعله مادة حاكه (Abrasive)	الأسبستوس (Asbestos)
تزيد من مقاومة الصدمات لكنها تقلل من الخصائص الكهربائية ومقاومة الماء	الأنسجة القصيرة (Chopped Fabric)
تزيد الصلابة وتقلل من المطولية وتجعله مادة حاكه.	الألياف الزجاجية (Fibre Glass)
تزيد من استقرارية الأبعاد، مقاومة الحرارة، وتُحسن من خصائص امتصاص الرطوبة وهي عادةً مواد حاكه.	غير العضوية (Inorganic Fillers)
يُحسن من الخصائص الاحتكاكية	ديسلفايد المولبدنيوم (Molybdenum Disulfide)
يقلل من الصلابة و الجماعة، لكنه يُحسن من الخصائص الاحتكاكية.	الفلوروكربون (Fluorocarbon)
يقلل من العزل الكهربائي، الكربون الغير المتبلور يكون مادة حاكه: والجرافيت الكربوني يُحسن من الخصائص الاحتكاكية.	الكربون (Carbon)
تقلل من العزل الكهربائي: وإذا زادت نسبته قد تجعل البوليمر موصلًا كهربائيًا.	المساحيق المعدنية (Metal Powder)

الحشوات في تحسين الصلابة هي بعملها كعوائق أو حواجز أمام حركة سلاسل البوليمر، فإذا أرادت هذه السلاسل ان تتحرك فعليها التغلب على هذه الموانع. من الأمثلة على المواد التي تضاف إليها الحشوات، الراتنجات الفينولية و الأمينية ، والتي في الغالب تُحشى ب مواد كدقيق الخشب أو السيليلوز قصير الألياف أو مسحوق المايكا أو الأسبستوس.

تضاف الحشوات الى البوليمرات لأسباب عديدة، فمثلاً تضاف المزلقات (Lubricants) في أشكال بوليمرات أخرى لتحسين خصائص مقاومة الاحتكاك. تضاف في بعض الحالات مواد غير عضوية خاملة لكي تُحسن من استقرارية الأبعاد. وإذا كانت الحشوة الغير العضوية لا تسمح للخليط بالنفاذ، فإننا سنلاحظ تأثيراً واضحاً في تقليل خصائص الخليط الامتصاصية للبوليمر. الجدول (1-4) يبين مجموعة من المواد المستخدمة كحشوات وتأثيرها على اللدائن.

(5) المثبتات والمواد الأخرى (Stabilizer and Other Additives)

هنالك مواد تضاف إلى المبلمرات للمساعدة على الاستقرار تسمى بالمثبتات، فهي تمنع تحلل أو تلف المواد المتبلرة وذلك من جراء تعرضها إلى ضوء الشمس والجو وعوامل بيئية خارجية مختلفة. فمثلاً لمنع التفسخ الكيميائي الضوئي لراتنج البولي أثيلين، يضاف إليه أسود الكربون الذي يقوم بحجز الضوء المسلط عليه. تضاف مواد أخرى كذلك لتمنح البوليمر مقاومة للتأكسد أو لكبح التأكسد مثل مركبات (الفينول، الأمينات العطرية، الكيتون وغيرها).

(6) مانعات اللهب (Flame Retardants)

تتأثر غالبية المبلمرات التي توجد بشكل نقي باللهب، فإذا أردنا زيادة مقاومة المبلمر للهب فإننا غالباً ما نستخدم عدداً من المواد المضافة مثل مركبات الأنتيمون.

(7) عوامل الترابط المستعرض (Crosslinking Agents)

وقد اشرنا إليها سابقاً (الفلكنة أحد الأمثلة على ذلك).

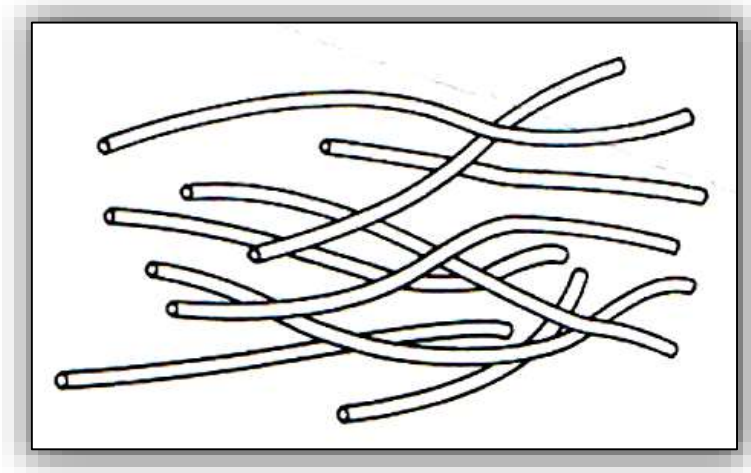
23-1 ميكانيكيات التقوية في اللدائن

باستثناءات قليلة، فان التقوية هي مهمة كيميائي البلمرة. فليس هنالك معالجات حرارية يمكن إجراءها على اللدائن لتحسين خواصها. على المصمم ان يكون متفهماً للعوامل الأساسية التي تتحكم في تصنيع اللدائن وبالتالي أيجاد الخواص المطلوبة فيه.

(1) البوليمرات الخطية (Linear Polymer)

من المهم جداً ان نعرف بأن للوزن الجزيئي للبوليمرات تأثيراً كبيراً على خواص اللدائن بصورة عامة. فزيادة الوزن الجزيئي للبوليمرات تزيد من مقاومته في الشد والانضغاط. وبنفس الطريقة فان تركيب البوليمرات المشتركة (Copolymerization) والتخليط (Alloying)، هي عمليات تُحسن من الخواص الميكانيكية. في بعض الأحيان ممكن ان يحتوي التخليط أو البوليمرات المركبة (Composite Polymers) على بوليمر ذو خصائص ضعيفة، والتي

ستؤثر سلباً على الخواص الميكانيكية، لكنه ربما يضاف ليُحسن من خاصية التزليق أو خصائص الاحتكاك، إن إضافة الفلوروكربون لأنواع عديدة من البوليمرات هو أحد الأمثلة على ذلك. إن العامل الأكثر أهمية في مسؤولية الحصول على الصلابة العالية (High Strength) والجماءة في البوليمرات، هي قوة الترابط بين سلاسل البوليمرات. ان ايسط البوليمرات الثرموبلاستيكية تمتلك سلاسل مستقيمة. هنالك شبكة ثلاثية الأبعاد لسلاسل البوليمر حيث ان كل سلسلة تتصرف كسلسلة لحالها. هذا يعني ان هنالك عرض قليل لسلسلة، لكن طول كبير. مثل هذا الهيكل موضحاً في الشكل (1-30).



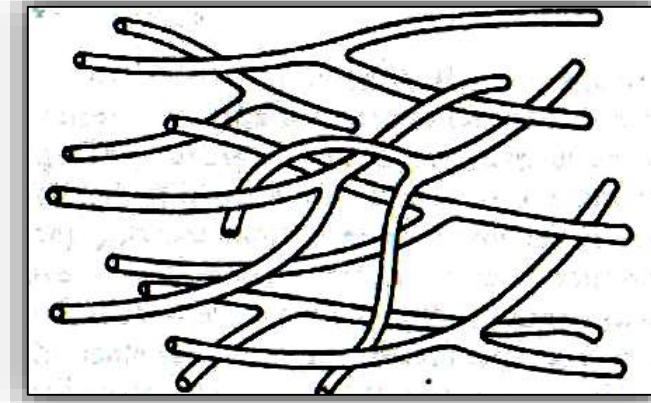
شكل (1-30) رسم تخطيطي لسلاسل البوليمرات في البوليمرات الخطية.

ان القوى الرابطة بين هذه السلاسل هي قوى فان دير فال، روابط هيدروجينية، أو تفاعل مجموعة قطبية (Polar Group). في البوليمرات الخطية تكون سلاسل البوليمر مرنة عادةً الى درجة أن هذه السلاسل تستطيع من الالتفاف حول بعضها البعض (كضفيرة) وتقع في مستوى واحد في الفضاء وتشبه في ذلك المعكرونة (Spaghetti). بسبب ترتيب سلاسلها العشوائي فإنها عادةً تكون ذات طبيعة غير بلورية (لا شكلية).

2) البوليمرات المتفرعة (المتشعبة) (Branched Polymers)

اذا كانت عملية التفرّع مقصودة أو عن طريق الصدفة أثناء عملية البلمرة، فان استمرار نمو السلاسل بصورة مستمرة سيحدث تزامن في نمو سلسلتين، فيقال انه هيكل متفرع. هذا المفهوم مبين في الشكل (1-31). يزيد التفرع من صلابة وقوة السلاسل، لان تشويه البوليمر في هذه الحالة سيتطلب حركة أكثر للسلاسل والتي تكون مضمفورة ومتشابكة أكثر مما في البوليمرات الخطية.

ان العديد من الإلاستومرات أو المطاط الصناعي يمتلك نفس هذا النوع من الهيكل، وهذا هو سبب امتلاكها المقاومة العالية واستطاعتها التمدد بمقدار كبير دون حدوث الكسر.

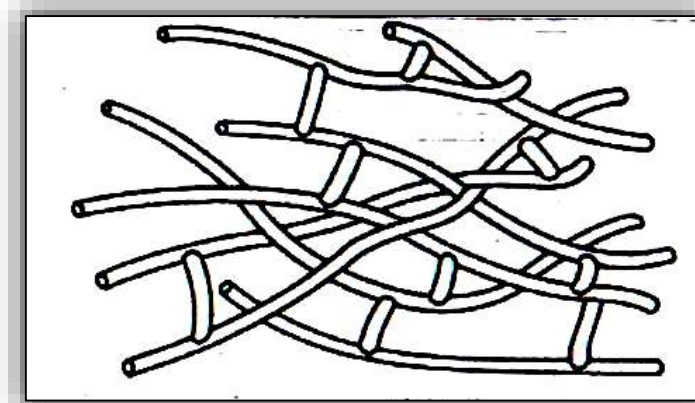


شكل(1-31) رسم تخطيطي لسلاسل البوليمرات المتفرعة.

(3) الترابط المستعرض (Cross-Linking)

إذا استطعنا خلال عملية تفاعل البلمرة من ان نربط بين السلاسل ببعضها البعض، فإننا سنحصل على هيكل قوي جداً وجاسيء. هذا ما سيحدث في الحقيقة لمعظم بوليمرات الترموستك. ظاهرة الترابط المستعرض تشمل روابط ابتدائية بين سلاسل البوليمر كما مبين في الشكل(1-32).

ان البوليمر المتكون عادةً لا يمكن إعادة صهره بسبب الروابط القوية جداً بين السلاسل. ان التفاعل بين السلاسل كالتقعر والترابط المستعرض، لا يحدثان في نفس المدى في أنواع البوليمرات المختلفة. فبعض البوليمرات ربما ستتقعر بقلة والآخرى ستتقعر بكثرة. نفس الشيء يحدث للتفاعل المستعرض، فكلما زادت جساءة البوليمر، قلت الذوبانية وقلت استجابة البوليمر للانصهار.



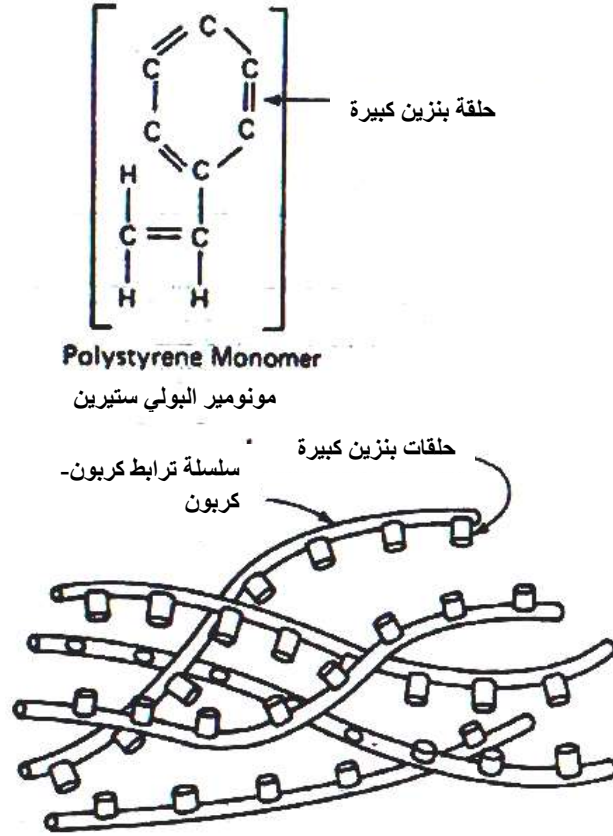
شكل(1-32) رسم تخطيطي لسلاسل البوليمرات مترابطة بشكل مستعرض.

ان معظم بوليمرات الثرموستيك تمتلك هذا النوع من الترابط وتستطيع ان تتحمل درجات الحرارة العالية لغاية (204 °C) ، بينما البوليمرات الخطية والتي يكون هيكلها أقل تعقيداً تنصهر عند درجة حرارة أعلى من (121 °C).

(4) تصلب السلاسل (Chain Stiffening)

تختلف طريقة تقوية البوليمر هنا عن الطرق السابقة لتقوية السلاسل، فهنا تحدث بسبب إحلل مجموعة كبيرة من الذرات محل ذرة في سلسلة البوليمر. لقد أوضحنا سابقاً كيف ان سلاسل البوليمرات الخطية ممكن أن تُضفر (تصبح على شكل ضفيرة) حول بعضها البعض. ان رابطة الكربون-كربون ستعمل كنقطة مفصلية لحركة السلسلة أثناء التثني. أفرض الآن ان البوليمر له مونومير كبير وغير متماثل، فان قابلية السلسلة للمرونة ستتضرر. ان البولي ستيرين هو مثال على هذا النظام كما مبين في الشكل (1-33).

البولي ستيرين المستخدم في صناعة لعب الأطفال، يكون هيكله جاسيء ونسبياً هش. ومرة أخرى فأن الهيكل الأساسي لسلسلة هو نفس هيكل البولي أثيلين (الطري والمطيلي). ان وجود حلقات البنزين الكبيرة في مونومير البولي ستيرين سيسبب انخفاضاً في قابلية الحركة للسلاسل وهذا سيؤدي الى زيادة الجساءة.

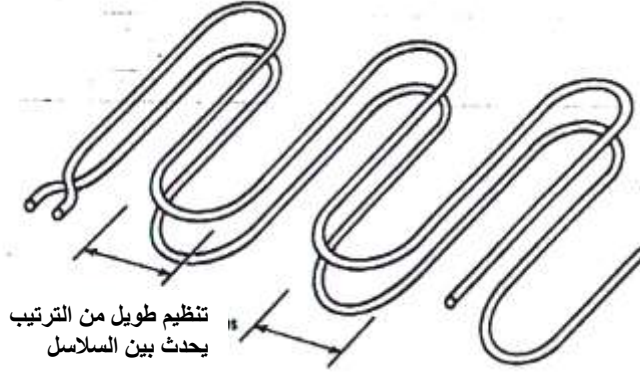


شكل(1-33) التقوية نتيجة لتصليب السلاسل.

(5) البلورية (Crystallinity)

على العكس من عمليات التقوية السابقة، يمكن السيطرة على التبلور بدرجة ما بواسطة المُصنِّع. فمن الممكن تحريضه من خلال عمليات القولبة بواسطة التوجيه الميكانيكي والإشعاعي. لقد أشرنا سابقاً بأن نسبة كبيرة من البوليمرات هي غير بلورية (لا شكلية) في الطبيعة حيث أنها لا تمتلك الترتيب المنتظم للشبكات والذرات، كما في المعادن والسيراميك المتبلور. هذه الجملة يجب إعادة صياغتها الآن، بما ان العديد من البوليمرات الهندسية، عندما تحلل بتقنية حيود الأشعة السينية (X-Ray Diffraction Technique)، فإنها تظهر درجة عالية من البلورية. بكلمة أخرى، ليس جميع الذرات التي تصنع منها سلاسل البوليمر تكون عشوائية الترتيب. فمن الممكن الحصول على البنية البلورية عندما تميل سلاسل البوليمر الى الاصطفاف، كما مبين في الشكل(1-34).

لكن ما يزال هنالك جدل حول طبيعة ترتيب سلاسل البوليمر في البوليمرات المتبلورة. لقد تم الحصول على دلائل البلورية بدراسة حيود الأشعة السينية. المواد الغير البلورية بالكامل كما في السائل سوف تظهر نموذج عام (Diffuse Pattern) فقط، على فلم الحيود للأشعة السينية.

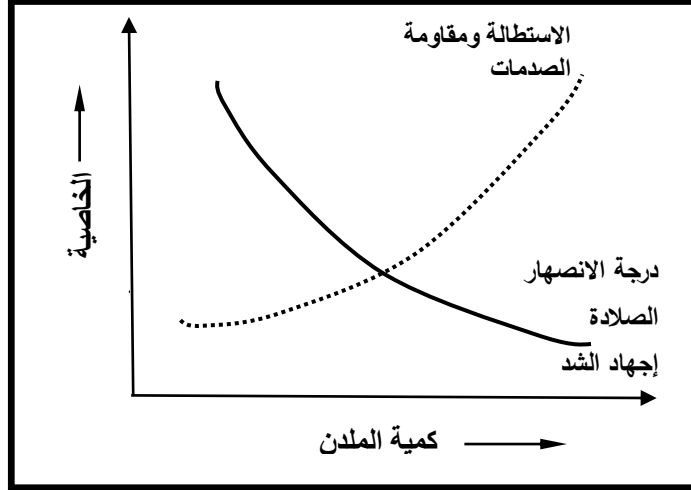


شكل (1-34) الترتيب المنتظم في سلاسل البوليمرات والذي يؤدي الى التبلور.

أما المواد البلورية فإنها سوف تُظهر نقاط أو خطوط على الفلم، لقد أمكن الحصول على نماذج حيود حادة للعديد من البوليمرات، لذلك فإنها تشير إلى أن البلورية تظهر بترتيب سلاسل البوليمر بانتظام. ان دراسة الخواص الميكانيكية و التغير في الحجم تشير إلى انه يمكن للبلورية أن تظهر في بعض البوليمرات بواسطة التبريد البطيء من الحالة المنصهرة. في بعض الأحيان من الممكن ان يصبح البوليمر متبلوراً أثناء القولية، كما أشرنا إلى ذلك سابقاً. سكاكين وشوكات البولي ستيرين والتي تستخدم لمرة واحدة في الزهات والحفلات، هي غالباً بلورية بسبب ان البوليمر المنصهر ينساب في أسفل القالب باتجاه المحور الطويل للجزء. هذه العملية تساعد على تصفيف سلاسل البوليمر. من الناحية العملية فان البلورية تزيد من درجة الانصهار، تقلل من الذوبانية (Solubility) في المذيبات، تقلل مقاومة الصدمات، وبصورة عامة تُحسن من خواص المتعلقة بالمقاومة الأخرى.

(6) الملدنات (Plasticization)

الملدنات هي كما اشرنا سابقاً، مزلاقات تضاف الى البوليمرات لتحسن خاصية المتانة (Toughness) والمرونة (Flexibility). وغالباً ما يكون لديها تأثير سلبي على الصلابة كما مبين في الشكل (1-35).



شكل (1-35) التأثير العام للملدنات على خواص البوليمرات.

(7) الحشوات (Fillers)

لقد أتضح ان تركيب مواد هندسية أخرى مع البوليمرات سيؤدي الي تغيير كبير في خواصها الميكانيكية والفيزيائية. ان ميكانيكية عمل الحشوات في التقوية (كما أوضحنا ذلك في سابقاً) هو في تقليل قابلية الحركة لسلاسل البوليمر. حيث ستعمل كحواجز أو مصدّات يجب على السلاسل أن تعبرها لكي تتحرك تحت تأثير الإجهاد.

بصورة عامة فان معظم الحشوات غير العضوية ستزيد من الصلابة. وكقانون عام، الحشوات التي تكون أصلد من البوليمر فأنها سوف تحسن من معدلات البلى اذا كان الجزء في حالة انزلاق مع معدن (احتكاك).

أسئلة الفصل

1. وضح ما هو فعل الترابط المستعرض، الحشوات، والتفرع في تصلب البوليمرات؟
2. أرسم الهيكل الجزيئي للبولي أثيلين و PVC.
3. علل ما يأتي:
 - أ. انفجار خرطوم الماء في مشع السيارة.
 - ب. يمكن لكيميائي البلمرة بالتحكم في تركيب المواد المتبلرة.
 - ج. للزيوت تأثير ضار على المطاط
 - د. لا يُرغب بالتبلور في الكثير من البوليمرات الصناعية.
 - هـ. ينشأ في البوليمرات الزجاجية تشقق تحت تأثير حمل الشد.
 - و. يمكن لبوليمرات الترموبلاستيك ان تعاد قولبتها بالتسخين لعدد غير محدود من المرات بينما لا يمكن ذلك لبوليمرات الترموستك.
 - ز. تُصنع نسبة عالية من البوليمرات بحشوات.
 - ح. استخدام الضغط في عملية الفلكنة.
 - ط. إضافة مواد تُدعى بالمدنات الى الكتلة المتبلرة قبل قولبتها.
 - ي. عندما يرغم النايلون المبتوق بالخروج من فتحة صغيرة خلال قالب، يكون الخيط المبتوق قوي جداً في اتجاه السحب.
 - ك. يفضل العاملون بقولية البوليمرات التعامل بالبوليمرات الترموبلاستيكية.
 - ل. لا توجد درجة انصهار محددة للبوليمرات خلافاً لما هو موجود في المعادن.
 - م. تعتبر الوظيفية مهمة لحدوث عملية البلمرة.
 - ن. يتضرر المطاط عند تعرضه للحرارة والزيوت.
4. اجب بعلامة صح (√) امام العبارة الصحيحة وعلامة خطأ (x) امام العبارة الخاطئة، وضح الخطأ أينما وجد.
 1. في عملية فلكنة المطاط يستطيع المنتج تغيير عدد الروابط بالتحكم بكمية الكبريت المضافة الى المطاط البارد. ()
 2. يمكن بواسطة القولية الميكانيكية توليد درجة من التنظيم في بعض راتنجات الترموستك التي لا تكون أنماطاً متبلورة في العادة. ()
 3. يُلدن النتروسيليز بالكافور للحصول على السيليلويد. ()

4. ان إضافة الألياف الزجاجية كحشوات للبوليمرات تزيد من مقاومتها وتزيد من مطيليتها. ()
5. يختلف التبلر بالإضافة عن التبلر بالتكثيف في كون في الأول لا يتم اكتساب أي ذرة. ()
6. في عملية البلمرة بالتكثيف تتكسر الروابط المزدوجة ولكن الترتيب للذرات يبقى على ما هو عليه. ()
7. ان قابلية جزيئات البوليمر على تكوين البلورات تتغير كثيراً اعتماداً على حجم جزيء البوليمر. ()
8. يجب اختيار الملدن المستخدم في الطلاء بمواصفات خاصة وهي أن تكون درجة حرارة التحول الزجاجي (T_g) أكبر قليلاً من درجة حرارة الغرفة لكي لا تكون طبقة الطلاء صلبة. ()
5. وضح كيف تتم عملية اختبار الشد في البوليمرات وما هي المعوقات التي تحول الى عدم دقتها؟ وما هي الأشكال التي يمكن أن يأخذها مخطط الإجهاد-الأنفعال.
6. قارن بين البلمرة بالإضافة والبلمرة بالتكثيف؟ وما هي الفائدة الرئيسية من البلمرة بالإضافة؟
7. كيف يستخدم كيميائي البلمرة:
- البوليمرات المشتركة،
 - حلقات الكربون في السلسلة الرئيسية،
 - حلقات الكربون كمجاميع جانبية،
 - التفرع،
- لإنتاج مواد متبلرة بالخواص المطلوبة؟
8. أشرح تأثير التبلور في المواد المتبلرة على:
- درجة حرارة الليونة.
 - الشفافية.
 - المقاومة الميكانيكية.
9. ما هو تأثير درجة الحرارة على معامل المرونة لبوليمر ثرموبلاستيكي غير متبلور (لا شكلي). وضح ذلك معززاً أجابتك بالرسم؟

الفصل الثاني

تقنيات تصنيع اللدائن

1-2 مقدمة

تُصنع معظم أنواع اللدائن إما بطريقة مباشرة من موادها الأولية التي تُحضّر عادةً على شكل مسحوق ناعم أو حبيبات خشنة نسبياً، أو يتم كبس المادة الأولية إلى منتج أولي على شكل أقراص حيث تُشكل إلى المنتج النهائي بعملية ثانية. يتم شراء معظم لدائن الترموبلاستيك (اللدائن التي تُلدن بالحرارة) على شكل حبيبات لذا تُرغّب وهي جافة أما لدائن الترموستيك (اللدائن التي تتصلب بالحرارة)، فيحصل عليها كسائل أو مركب مبلر جزئياً. إن من أهم تقنيات تصنيع اللدائن هي:

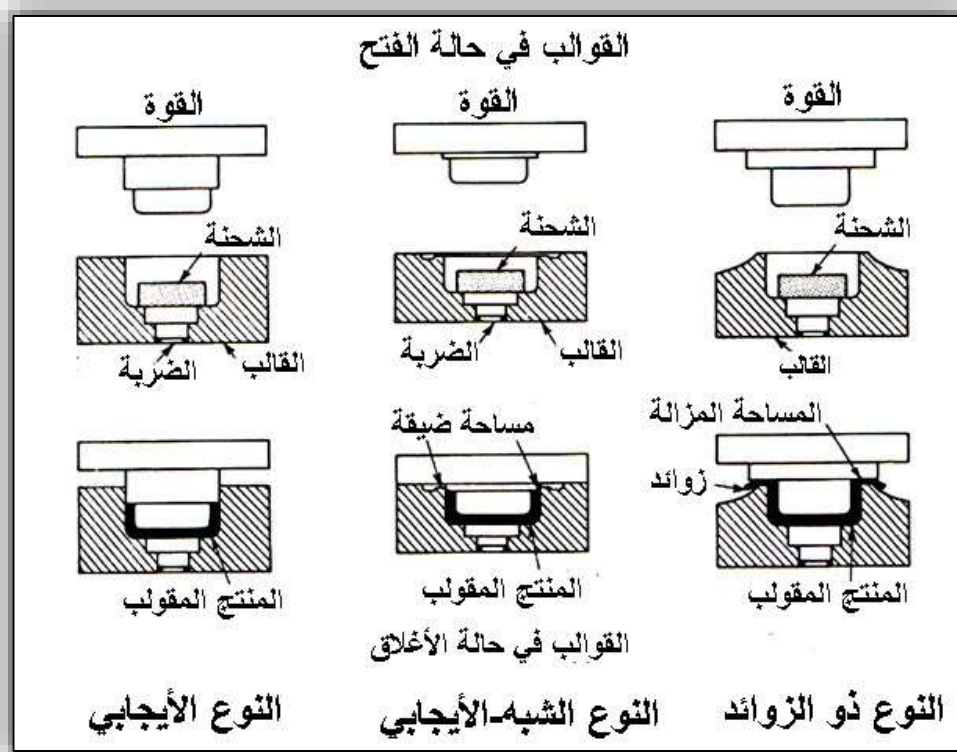
2-2 القولية بالكبس (Compression Molding)

في هذه الطريقة يتم وضع كمية محدودة من المادة المتبلرة في قالب معدني ساخن، وحالما يغلق القالب يتم تسليط الضغط الذي يؤدي إلى انسياب المادة المليئة لتأخذ شكل فجوة القالب، كما مبين في الشكل (1-2). إن القالب هنا يبقى مغلق لفترة زمنية كافية حتى يسمح بتشكيل وتصلب المنتج. إن المادة هنا يمكن إن تكون على شكل حبيبات أو عبوة مسبقة التشكيل. يتراوح الضغط المستخدم في عملية التشكيل بهذه الطريقة ما بين (15 إلى 55 ميجا باسكال MPa) وذلك بحسب نوع المادة المستخدمة وتصميم المنتج، وتتراوح درجة الحرارة ما بين (120 إلى 260 °C).

تستخدم تقنية القولية الإنضغاطية في الغالب لللدائن الترموستيك، التي يجب أن تنتضج بواسطة تسخين القالب. إن استخدام الطرائق الأخرى هي أسرع للإنتاج الكبير لللدائن الترموبلاستيك. إن استخدام الحرارة مهماً لللدائن التي تُصلب بالحرارة (الترموستيك)، وذلك لأنه يمر بمرحلتين حيث يلين أولاً ومن ثم يتبلر فيتصلب، لذلك فإن التسخين المنتظم أمراً مرغوب فيه إلا أنه أمر يصعب تحقيقه بسهولة نظراً لرداءة التوصيل الحراري للمادة. فلتحسين كفاءة انتقال الحرارة بهذه الطريقة، يجب أن تكون الأشكال بسيطة وجدرانها متماثلة ويُفضّل أن يكون سمكها إن لا يتجاوز (3 ملليمتر). ورغم ذلك فإن عملية إنضاج الشحنة بواسطة تسخينها قد يستغرق عدة دقائق. يمكننا تخفيض هذا الوقت بنسبة (50%) بواسطة تسخين الشحنة قبل

وضعها بالقالب. لتسريع عملية القولبة بهذه الطريقة إلى أقصى ما يمكن، يمكننا استخدام الآلات المؤتمتة أو شبه المؤتمتة. يتم توجيه الحرارة لتلين المادة اللدائنية و يمكن أن تنتقل عن طريق لوحاً ساخناً (على المنضدة) أو يوجه مباشرة إلى القالب المعدني بواسطة بخار ساخن أو سائل ساخن أو بمقاومة كهربائية أو بذبذبات فائقة للتيار الكهربائي.

الأنواع الثلاثة الأساسية للقولبة الانضغاطية للبلستيك مبينة في الشكل (1-2). حيث في النوع الأول (النوع الايجابي) يتم تسليط القوة بإحكام (Snugly). حيث تؤثر القوة بالضغط التام على المادة لإجبارها لملأ فجوة القالب. ويجب التحكم هنا بكمية الشحنة بدقة لإنتاج منتجات دقيقة الأحجام. أما في الطريقة الثانية (النوع شبه-الاجيبي)، فان القوة ستسقط للحصول على تسامح قريب فقط خلال المليمترات الأخيرة من شوط الكبس، حيث يتم تسليط الضغط الأقصى عند إغلاق القالب، ويسمح لمادة الشحنة الزائدة بالخروج، لذلك فليس من الضروري أن تكون هنا كمية الشحنة دقيقة، وتعتبر هذه الطريقة الأفضل في حالة الإنتاج الكبير و الجودة العالية.



شكل (1-2) ثلاثة أنواع من القولبة الانضغاطية لللدائن.

في الطريقة الثالثة (النوع ذو الزوائد أو الفائض) لا يتم تسليط القوة بإحكام على المنتج بل يسلط قسم منها على الزوائد الناتجة من الشحنة. ولا نحتاج إلى التحكم بكمية الشحنة، فالكمية الزائدة ستخرج كزوائد رقيقة خارج فجوة القالب. وتعتبر الزوائد

كفضلات (Waste) لا يمكن إعادة استخدامها (لأن المادة من نوع الثرموستيك)، ويجب تشذيب (Trimming) كافة المنتجات. نتيجة لعدم تسليط الضغط التام على المنتج، فإن القالب المصنوع لهذه الطريقة يعتبر الأرخص ثمناً.

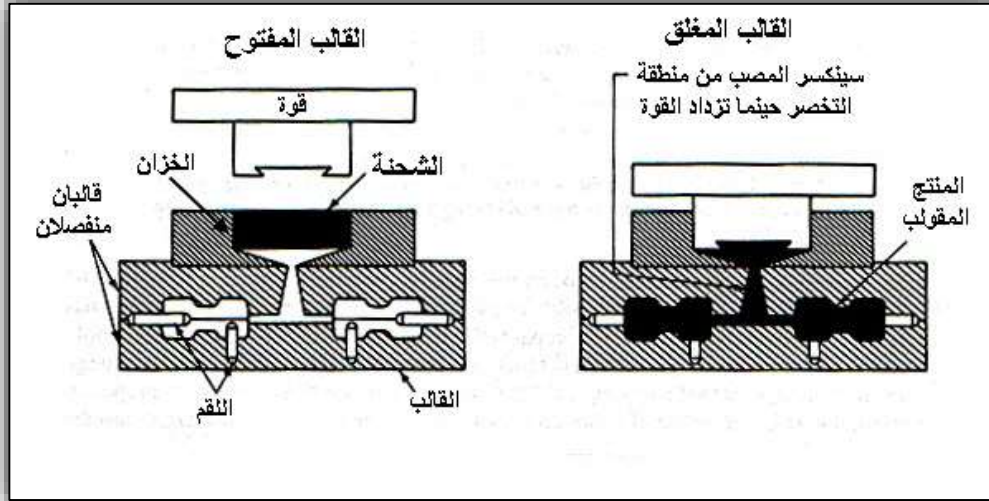


شكل (2-2) آلة القولية بالكبس.

طريقة القولية الإنضغاطية يتم تنفيذها بالغالب باستخدام الحرارة، لكن في بعض الحالات يمكن استخدام القولية الإنضغاطية الباردة، وخاصةً للمركبات من النوع المقاوم للحرارة، بسبب سرعة العملية. حيث يتم كبس المادة في هذه الطريقة إلى الشكل المطلوب باستخدام القالب المناسب، ثم يتم تسخينها بالفرن حتى تتضج (Cured). لا يتم التحكم بالحجم بهذه الطريقة وكذلك التشطيب يكون أسوأ مما في القولية الإنضغاطية الساخنة. شكل (2-2) يبين إحدى أنواع آلات القولية بالكبس.

3-2 القوالب الانتقالية (Transfer Molding)

في تقنية القوالب الانتقالية والتي يُطلق عليها أيضاً البثق أو القوالب البوابية (Gate Molding)، تُسخن المادة و تُضغط في غرفة واحدة ومن ثم تُجبر على المرور من خلال مصب (Sprue)، ثم مجرى، و منفث (Orifice) إلى داخل فجوة القالب (الشكل 3-2).



شكل (3-2) القوالب الانتقالية.

في هذه التقنية، توضع مساحيق اللدائن التي تتصلب بالحرارة (الثرموستت) أو عيوباتها المشكلة مسبقاً (Preform) في فجوة منفصلة أو خزان كبس موجودة فوق فجوة القالب كما مبين في الشكل (3-2). تتلين المادة داخل الخزان بفعل الحرارة بشكل أولي ثم تضغط، حيث يتم حقنها داخل فجوة القالب على شكل مائع ساخن، بعدها ستتضج و تتصلب.

باستخدام هذه التقنية، من الممكن الحصول على سامحات أدق (Closer Tolerances) (أي إنتاج أشكال دقيقة) وكثافة متجانسة أفضل، والزمن بصورة عامة أقصر للمقاطع السميكة، ويمكن أن تكون هنالك مقاطع سميكة وأخرى نحيفة في نفس المنتج كما يمكن إدخال قطع معدنية في المنتج (إنتاج أجزاء مُلقمة) مع مشاكل أقل بالمقارنة مع التقنيات الأخرى. السبب يعود إلى كون المادة الداخلة إلى فجوة القالب ستكون تحت تأثير ضغط يتراوح ما بين (40 إلى 85 MPa) وسيكون سلوكها كالمائع.

ان أحد عيوب هذه التقنية هو فقدان المادة في الخزان والمصب ومجري الصب بالإضافة إلى الكلفة العالية للقالب، شكل (2-4) يبين إحدى أنواع هذه الآلات.



شكل(2-4) آلة القولبة الانتقالية.

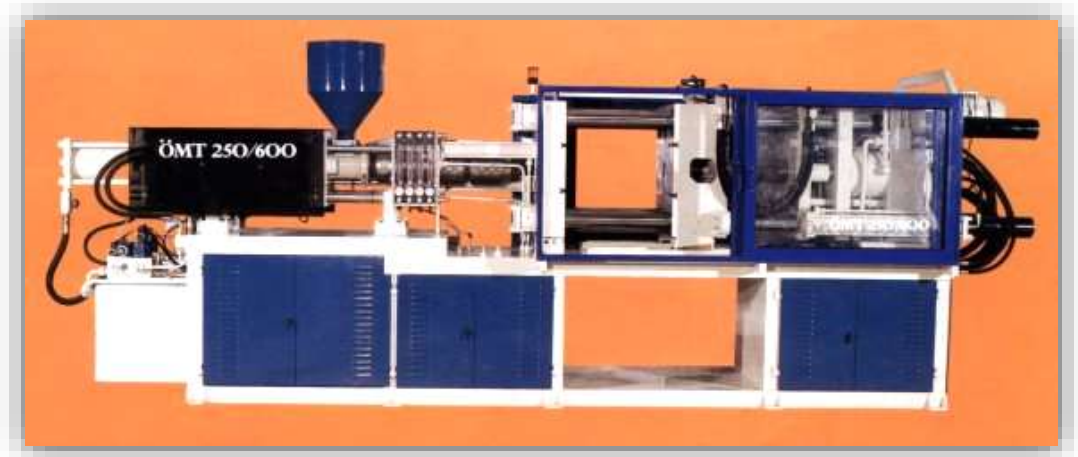
4-2 القولبة بالحقن (Injection Molding)

في هذه التقنية يتم تحويل المادة المُلينة حرارياً من حبيبات إلى سائل، ثم يتم حقنها بداخل فجوة القالب حيث تتصلب. ويمكن تكرار تحول هذه المادة من صلابة إلى سائلة (لأنها ثرموبلاستيك) دون حدوث تغيير كيميائي مما يجعلها طريقة مثالية للإنتاج السريع وتقاس سعة آلات التشكيل بالحقن بمقدار القوة بالنيوتن التي بها يتم غلق نصفي القالب على بعضهما البعض، وبكمية المادة التي تُحقن في كل دورة ولمعظم آلات هذا النوع، قوة غلق القالب تتراوح ما بين (0.4 إلى MN 22) وسعة الغدفة (Shot Capacity) تتراوح ما بين (أقل من غرام لغاية 9 كيلو غرام)، الشكل (2-5).

إن مخطط لتقنية القولبة بالحقن للمواد اللدائنية موضح في الشكل (2-6). ان أقدم طريقة هي طريقة الكباس ذو المرحلة الواحدة (Single-Stage Plunger Method). فعندما يُسحب الكباس (Plunger) إلى الخلف، ستسقط المادة من القادوس (Hopper) إلى داخل الغرفة (Chamber). ثم يُدفع الكباس إلى الأمام ليجبر المادة بالمرور خلال الأسطوانة الساخنة، حيث ستتلين و تُحقن تحت تأثير الضغط داخل فجوة القالب. يعتبر نظام اللولب الترددي ذو المرحلة الواحدة (Single-Stage Reciprocating Screw System) هو الأكثر شيوعاً، لأنه أكثر كفاءةً في تحضير المواد خلال القالب وبصورة عامة أسرع. فعندما يدور اللولب، فإنه يدفع إلى

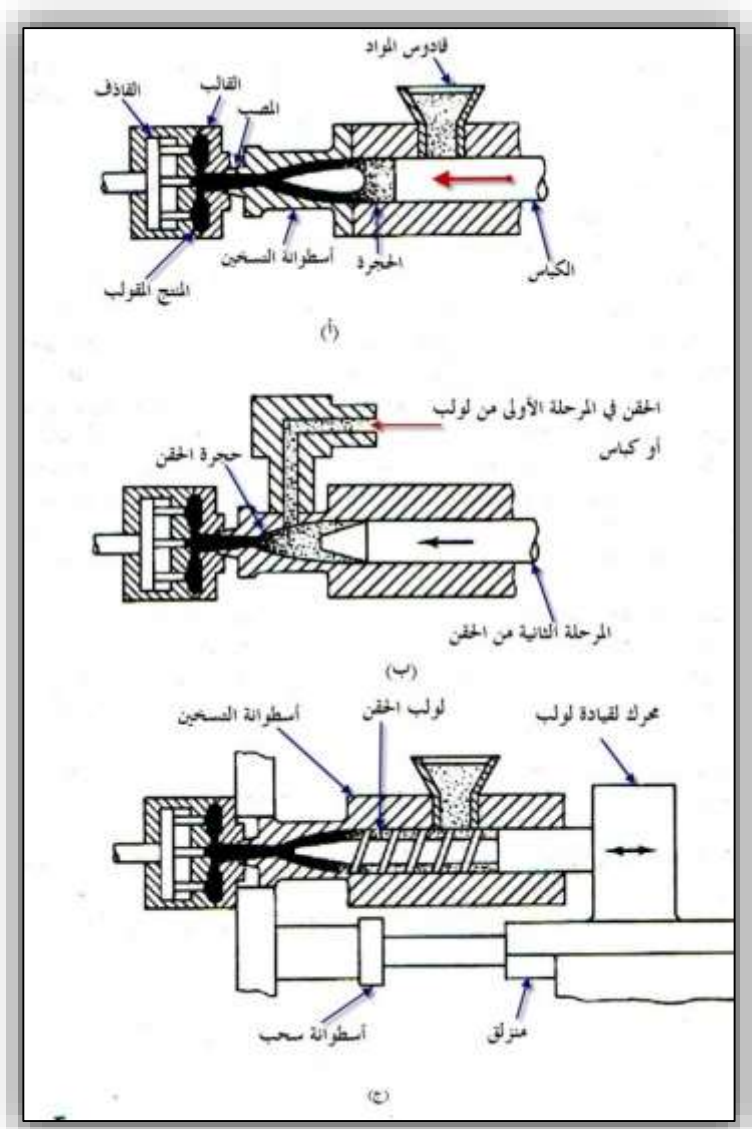
الخلف و يحشر الشحنة القادمة من القادوس بالاسطوانة الساخنة. وعندما يتم تحضير مادة كافية، يتوقف اللولب عن الدوران ويتم دفعه إلى الأمام ككباس ليضغط الشحنة إلى داخل فجوة القالب. في النظام ذو المرحلتين، تُلدن المادة في أسطوانة واحدة، ويتم تحويل قسم من هذه المادة المُلدنة باستخدام كباس أو

لولب باتجاه غرفة القذف (Shot Chamber) والتي منها يقوم الكباس بحقنها إلى فجوة القالب والمصبب من جانب الحقن ويقذفان من الجانب الآخر للقالب عند فتحه. يتم إغلاق القالب مرة أخرى بإحكام لتبدأ دورة قولبة أخرى. من الممكن حقن اللدائن من نوع الثرموستنك لكن يجب بلمرته و قولبته قبل تهيئته في الماكينة. ممكن أن تتم هذه باستخدام ماكينة اللولب الترددي حيث يتم شحن شحنة واحدة في وقت معين إلى درجة حرارة الإنضاج. باستخدام طرق أخرى، يطلق عليها في بعض الأحيان بالقولبة النفاثة (Jet Molding)، حيث يتم شحن المادة المُسبقة التشكيل في وقت واحد إلى كباس الآلة ذو المرحلة الواحدة.



شكل (2-5) آلة القولبة بالحقن.

هنالك آلات متوفرة لقولبة الأجزاء ذات الطبقة البينية (Molding Sandwich Parts). حيث يتم حقن كمية مقاسة بواسطة أسطوانة أو كباس، للمادة بشكل طبقة جلدية في داخل فجوة القالب، ثم تقوم أسطوانة ثانية بحشر المادة الحشوة داخل الكتلة. أخيراً، يجري تدفق نهائي من الاسطوانة الأولى ينظف مادة قلب المنتج المتوسطة من المصبب. الغرض هو إنتاج مادة مُركبة بأفضل الخواص، من الممكن أن يكون إما القلب أو الغلاف (Case) مادة رغوية (Foam).



شكل (2-6) نظام القولبة بالحقن: (أ) الكباس ذو المرحلة الواحدة: (ب) الكباس ذو المرحلتين: (ج) اللولبي الترددي ذو المرحلة الواحدة.

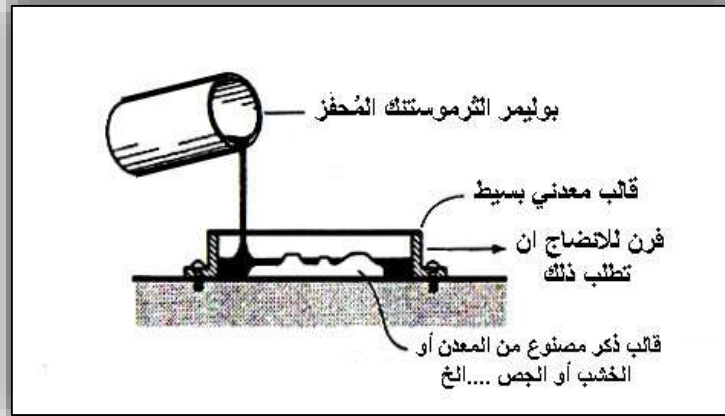
تعتبر عملية القولبة بالحقن من التقنيات المنخفضة التكاليف في صناعة منتجات لدائنية من نوع الترموبلاستيك وبكميات كبيرة. ان الآلات المؤتمتة يمكن ان تنتج ستة قذفات بالدقيقة وهي شائعة للاستخدام في المنتجات المعتدلة-الحجم. يمكن إنتاج الأشكال المعقدة و بتسامحات دقيقة دون الحاجة إلى عمليات إضافية. ان فضلات المواد (Scraps) الناتجة عن هذه العملية يجب أن تكون أقل من (10%) من كمية المواد المستخدمة. ان عملية القولبة بالحقن للترموستك هي (25%) أسرع من القولبة الإنضغاطية، لكنها تحتاج إلى اهتمام خاص.

5-2 السباكة (Casting)

تستخدم المواد الراتنجية السائلة (Liquid Resins) في القولية بالسباكة باستخدام قوالب مصنوعة من مواد لينة نسبياً، كالمطاط والجبس (Plaster)، الخ وفي بعض الحالات من الرصاص. يمكن تشكيل مثل هذه القوالب بسهولة حول شكل النموذج (يمثل شكل المنتج) المصنوع من الخشب، الجبس، المعدن... الخ. وتستخدم هذه الطريقة (الشكل 2-7) لإنتاج الأشكال المجوفة أو المصمتة من بوليمر مصهور أو راتنج مُحفَّز للبلمر، والأخير بعد صبه في القالب عادةً يسخن (بدون الحاجة إلى تسليط ضغط) في فرن لمدة ساعات أو أيام عند درجة حرارة تتراوح بين (65 - 95 °C) لكي ينضج أو يتصلب.

يكون القالب مفتوحاً من الأعلى عادةً والمعدات المستخدمة في هذه التقنية قليلة الكلفة، لكنها تعتبر طريقة بطيئة، وهي تستخدم في الحالات التي يكون فيها عدد القطع المطلوب إنتاجها غير مجدي لتصنيع قالب عالي التكلفة. وهي طريقة يمكن ان تستخدم لكلا النوعين من اللدائن الثرموستيك و الثرموبلاستيك.

من الأمثلة على منتجات هذه الطريقة، الخلي (Ornaments)، النماذج الأولية (Prototype)، القوالب والأجزاء الكهربائية الملقمة.



شكل (2-7) سباكة اللدائن.

من ضمن مواد الثرموستيك التي تستخدم في القولية بالسباكة هي الفينول (Phenolics)، البولي يستر، الأيبوكسي، و راتنجات الألايل (Allyl Resins). ويستخدم الأخير في صناعة عدسات المجهر والتطبيقات التي تتطلب وضوحاً ممتازاً. ان هذا النوع من الراتنجات (الثرموستيك) له استخداماً واسعاً في السباكة بالمقارنة مع الراتنجات من نوع الثرموبلاستيك، وذلك لأنه يمتلك انسيابية عالية في السكب.

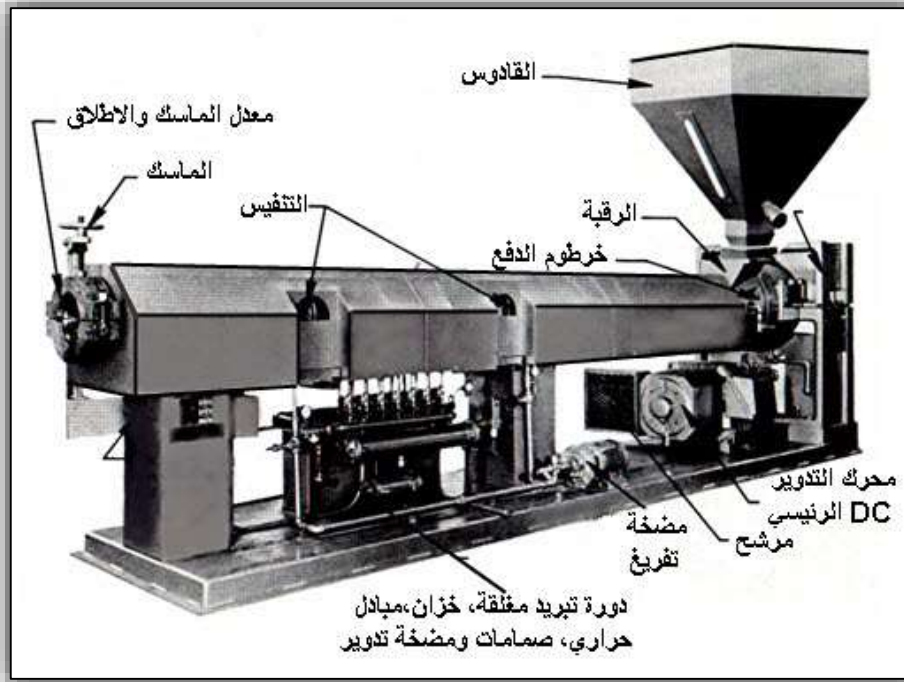
يستخدم بيوتيريت أسيتات السليلوز (Cellulose Acetate Butyrate) وأثيل السليلوز وكلاهما من نوع الترموبلاستيك في الحالات التي تتطلب مقاومة عالية للصدمات و الجساءة التي نحتاجها في صناعة المطارق و القوالب. أما الأكريليك (Acrylics) فيستخدم في سبابة القطع الشفافة و الصفائح المستوية.

2-6 القولية بالبتق (Extrusion)

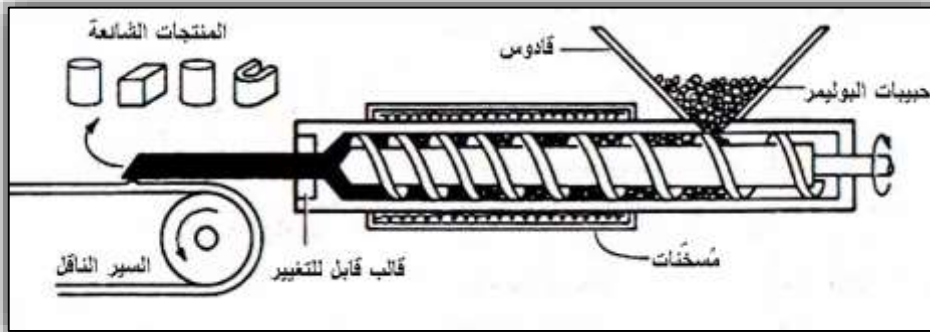
ان الغرض من هذه العملية هو إنتاج أشكال مستمرة باستخدام القوة لإجبار البوليمر المصهور في المرور من خلال قالب معدني باستخدام آلات خاصة كما مبينة في الشكل (2-2-8). يستخدم البثق في إنتاج الأشكال الهيكلية كالفنوتات والقضبان والأقواس والخراطيم و الأنابيب والألياف والأفلام وأشكال أخرى. إنها عملية سريعة جداً وتستخدم في الغالب لمواد الترموبلاستيك مثل راتنجات الفينيل، البولي ستارين، البولي أثيلين، البولي بروبيلين و النايلون. حيث يمكن تشكيل هذه المواد باستخدام قوالب بسيطة.

ويوضح الشكل (2-9) رسماً تخطيطياً لعملية البثق، حيث تتم تغذية المادة المتبلمرة بهيئة حبيبات أو مسحوق من خلال القادوس (Hopper) الذي يقع في خلف الاسطوانة. تقاد المادة بعد ذلك للدخول إلى الغرفة الساخنة وذلك باستخدام لولب حلزوني ضاغط (Spiral Screw)، حيث تصبح المادة في هذه الغرفة عبارة عن كتلة لزجة سميكة والتي سيتم ضغطها وهي بهذه الحالة من خلال القالب. وفور خروج المادة المبتوقة من القالب، سَتُبْرَدُ بالهواء أو بالماء أو بالتماس مع سطح مبرّد فتتصلب بالتدرج، وهي ممتدة على الحزام الناقل. بعض المنتجات مثل أنابيب التأسيسات الكهربائية وأنابيب المجاري للمواد الكيماوية سَتُصْنَعُ بهذه الطريقة، لان مواد الترموبلاستيك المبتوق يمكن ثنيها أو تقويسها إلى أشكال مختلفة بعد عملية البثق، وذلك باستخدام الماء الساخن.

لا تصلح اللدائن المتصلبة حرارياً (الترموستتك) لمثل هذا النوع من عمليات التشكيل، لأنها تتصلب بسرعة كبيرة، لذلك فهي محدودة الاستعمال، غير أنها تستعمل لإنتاج الأنابيب ذات الجدران السميكة.



شكل (8-2) آلة البثق.

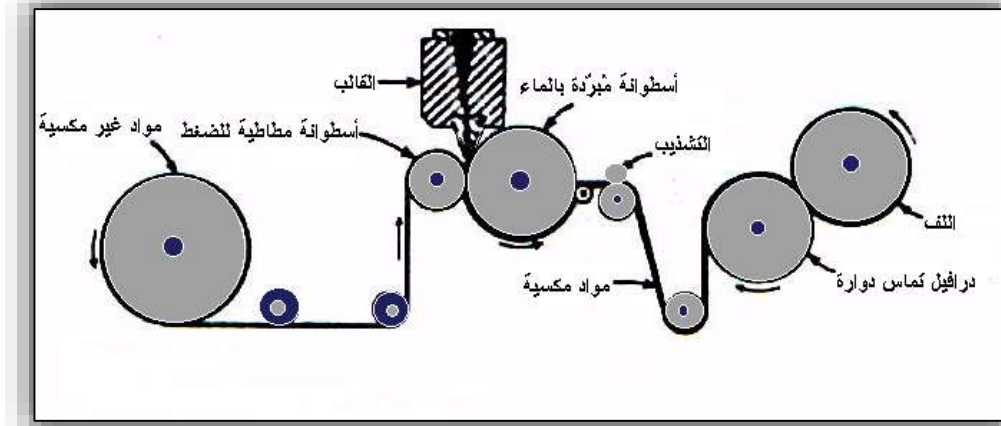


إن الآلات التي تستخدم في عملية بثق مواد الثرموستك تستخدم مك (Ram) بدلاً عن اللولب في تسليط القوة على المادة وإجبارها على الخروج من القالب. تغذى المادة من القادوس الذي يقع خلف الاسطوانة، وباستخدام أشواط متعددة من المدك سيؤدي ذلك إلى إجبار المادة بالخروج من القالب المسلوب (Tapered Die) والذي فيه منطقة التسخين. هنالك حرارة إضافية تنشأ نتيجة لاحتكاك المادة خلال الاسطوانة والقالب، سيتم الإنضاج عند بلوغ النهاية الأمامية. بالإمكان

إنتاج بعض المنتجات كالقوالب، الأنابيب، القضبان، المحامل، بطانات الفرامل والتروس. ويمكن الحصول على تسامحات بمقدار (4%) . الشكل (2-10) يبين بعض منتجات هذه الطريقة. هنالك عملية تسمى الإكساء بالبتق (Extrusion Coating) وهي طريقة تستعمل بصورة واسعة لإكساء الورق والقماش والرقائق المعدنية. حيث يتم بثق مادة الترموبلاستيك من خلال قالب مُسطح (Flat Die) وتخرج بشكل صحيفة تمرر إلى الأسفل كما مبين في الشكل (2-11). بعد بثق المادة الملمية حرارياً خلال قالب المُنبسط على شكل صحيفة تمرر إلى الأسفل لتتلقاها اسطوانة مطاطية تقوم بضغطها ضد اسطوانة درفلة من الصلب، بضغط مناسب. يتم تشذيب حافات الصحيفة (Sheet) من أجل لفها. في الوقت الذي يمكن استخدام أي مادة من نوع ترموبلاستيك للإكساء، إلا أن المواد الشائعة الاستعمال هي الفينيل (Vinyles)، البولي بروبيلين والبولي أثيلين. هنالك استعمالاً مهماً آخرًا لعملية الإكساء بالبتق تتمثل في عزل الأسلاك والكابلات، حيث إن عملية الإكساء تتم بصورة اقتصادية ولها خواص كهربائية وفيزيائية ممتازة.



شكل (2-10) أشكال متنوعة لمنتجات تم الحصول عليها بالقولبة بالبتق.



شكل (2-11) مخطط لعملية الإكساء بالبتق

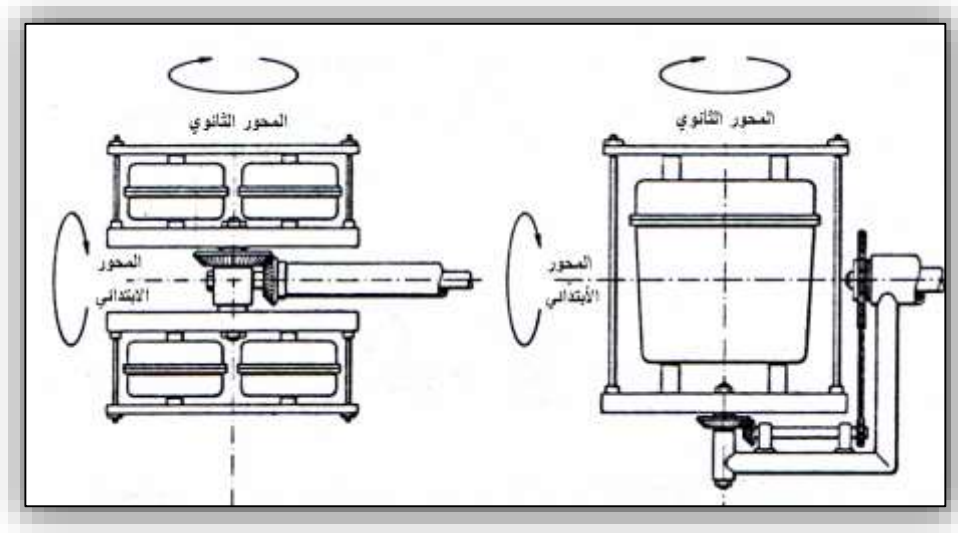
7-2 القولية الدوارة (Rotating Molding)

تتم القولية الدوارة بواسطة الدوران المتزامن لقالب رقيق الجدران حول محورين، ابتدائي وثانوي، والذين يكونا متعامدين على بعضهما البعض. فبعد عملية شحن (تغذية) المواد اللدائنية المناسبة، يُسخن القالب أثناء دوارنه، مما يؤدي إلى انصهار الحبيبات في المساحة الداخلية للفجوة القالب متكوناً على شكل طبقات حتى يتم الانصهار التام للمادة اللدائنية. يُبرّد القالب وهو مستمراً بالدوران ويُفتح حتى يتم إخراج المنتج التام وإعادة شحنه تارةً أخرى. تستخدم هذه الطريقة في صناعة الألعاب ويستخدم البلاستيكسول (Plastisols) والبولي أثيلين لصناعة الألعاب التي يمكن ضغطها.

تختلف طريقة القولية الدوارة عن عمليات القولية الأخرى في أن جميع الطرائق الأخرى تستخدم الضغط والحرارة في عملية القولية بينما لا تستخدم هي إلا الحرارة. يجب تثبيت مقاطع القالب بإحكام حتى لا تدخل الرطوبة إلى القالب وتسبب حدوث اعوجاج (Warping) بين نصفي القالب.

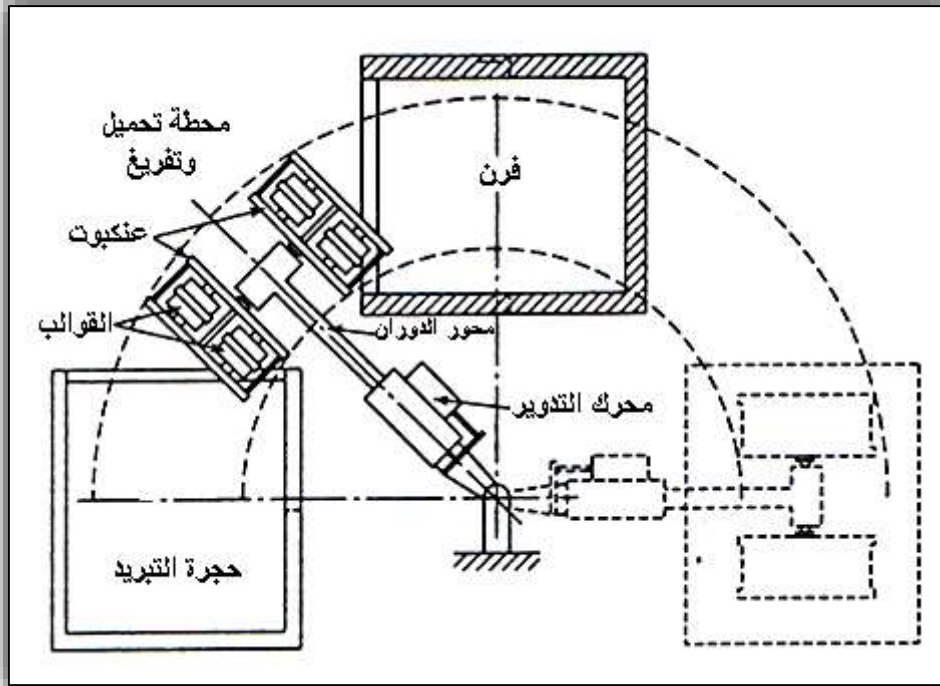
في الغالب يُستخدم الألمنيوم-المصبوب (Cast-Aluminum) في تصنيع قوالب هذه الطريقة ولكن يمكن استخدام النحاس المشكل كهربائياً (Electroformed Copper) أو الصلب الكربوني كذلك. يتم التحكم بالسرعة الدورانية لمحوري العمودين بواسطة محرك منفصل، في

الغالب تكون النسبة (1:3) بين المحورين الرئيسي و الثانوي. السرعة الدورانية للمحور الرئيسي هي بصورة عامة أدنى من (18 rpm)، بينما مدى درجة حرارة القالب هي (260 – 370 °C).



شكل (2-12) رسم تخطيطي للقوالب الدوارة مبيناً فيها نظاماً للتثبيت.

إن أساس عمل القوالب الدوارة مبيّن في الرسم التخطيطي في الشكل (2-12)، في حالة استخدام قالب واحد كما مبيّن، بينما الرسم الآخر في حالة استخدام مجموعة تتألف من أربعة قوالب في ذراع وحدة واحدة. في كلا الحالتين ستكون الذراع مزودة بمحور ارتكاز حتى تتمكن من التآرجح ما بين فرن التسخين وغرفة التبريد، كما مبيّن في الشكل (2-13). من فوائد هذه الطريقة هي قلة التكلفة الابتدائية، المرونة التي تسمح باستخدام أقسام مختلفة لكي تصنع بنفس المعدات، قلة تكاليف المعدة، ويمكن إنتاج منتجات مغلقة أو مفتوحة النهايات، تعطي تفاصيل دقيقة، تشطيب ممتاز للأسطح، قلة كلفة التبريد، وكلفة المنتج قليلة. من الأمثلة على منتجات هذه الطريقة هي كراسي الأطفال، حاويات تخزين الغذاء، واقيات الآلات، سلال القمامة، حافظات الصور الفوتوغرافية، خزانات الجازولين.



شكل (2-13) رسم تخطيطي لذراع الارتكاز لنظام تحريك القالب. محور الدوران يتأرجح في زاوية (90°) بشكل قوس ما بين غرفتي التسخين والتبريد. إضافة غرفة تبريد ثانية (الخطوط المنقطة لمحور الارتكاز والدوران، ستقلل من زمن الدورة).

تستخدم نفس المعدات في القولية سواء كانت اللدائن هي من نوع ثرموبلاستيك أو ثرموستك.

8-2 القولية بالنفخ (Blow Molding)

هي عملية يتم من خلالها تسخين أنبوب لدن من الثرموبلاستيك يُطلق عليه الباريسون (Parison)، يتم نفخه لاحقاً في قالب مغلق تمثل فجوة القالب شكل المنتج المطلوب. تستخدم آلات القولية بالنفخ لإنتاج الحاويات الرقيقة الجدران بمختلف أنواعها والقناني المدورة والأنابيب والقوارب الصغيرة وألعاب الأطفال والتي تصنع عادةً من راتنجات الثرموبلاستيك. المواد الشائعة الاستخدام في هذه التقنية هي:

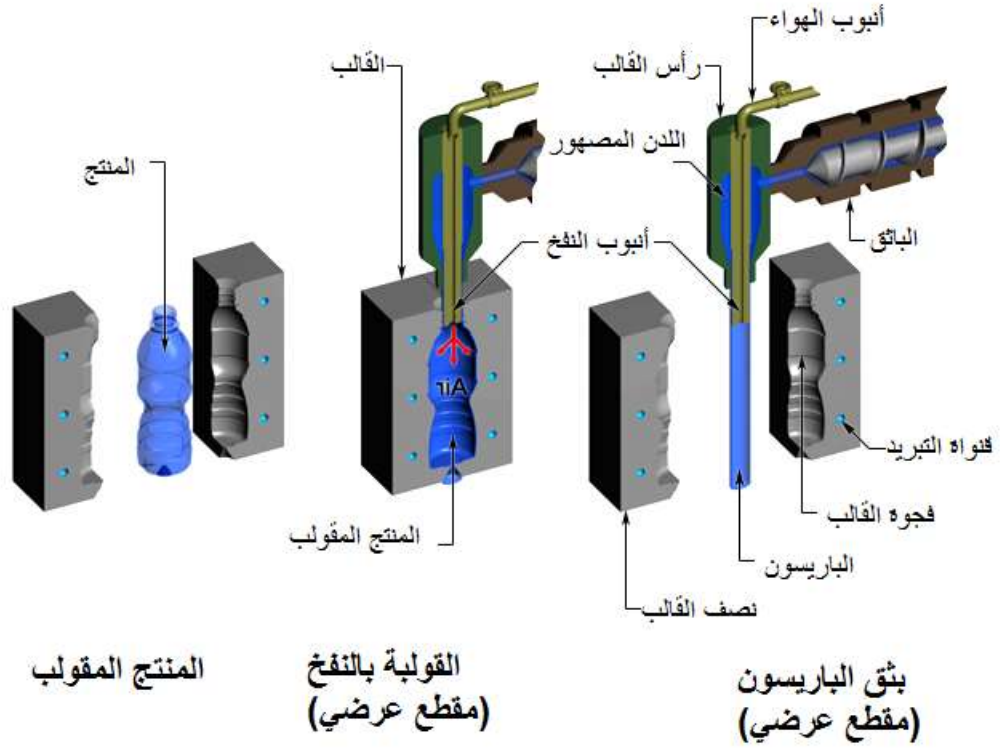
1. البولي أثيلين المنخفض الكثافة (LDPE) والبولي أثيلين العالي الكثافة (HDPE).
2. البولي بروبيلين (PP).
3. البولي فينيل كلورايد (PVC).
4. البولي أثيلين تيريفتاليت (PET).

هنالك ثلاث أنواع رئيسية للقولية بالنفخ وتختلف فقط في طريقة تحضيرها للباريسون وهي:

1-8-2 قولبة النفخ بالبتق (Extrusion Blow Molding)

وتتضمن تصنيع الباريسون بالطريقة التقليدية بالبتق وذلك باستخدام قالب مشابه للقالب الذي يستخدم في صناعة الأنابيب بالبتق. مخطط لآلة قولبة النفخ بالبتق مبين في الشكل (2-14) وصورة للآلة مبينة في الشكل (2-15). وتتضمن دورة الإنتاج المبينة في الشكل (2-16) الخطوات التالية:

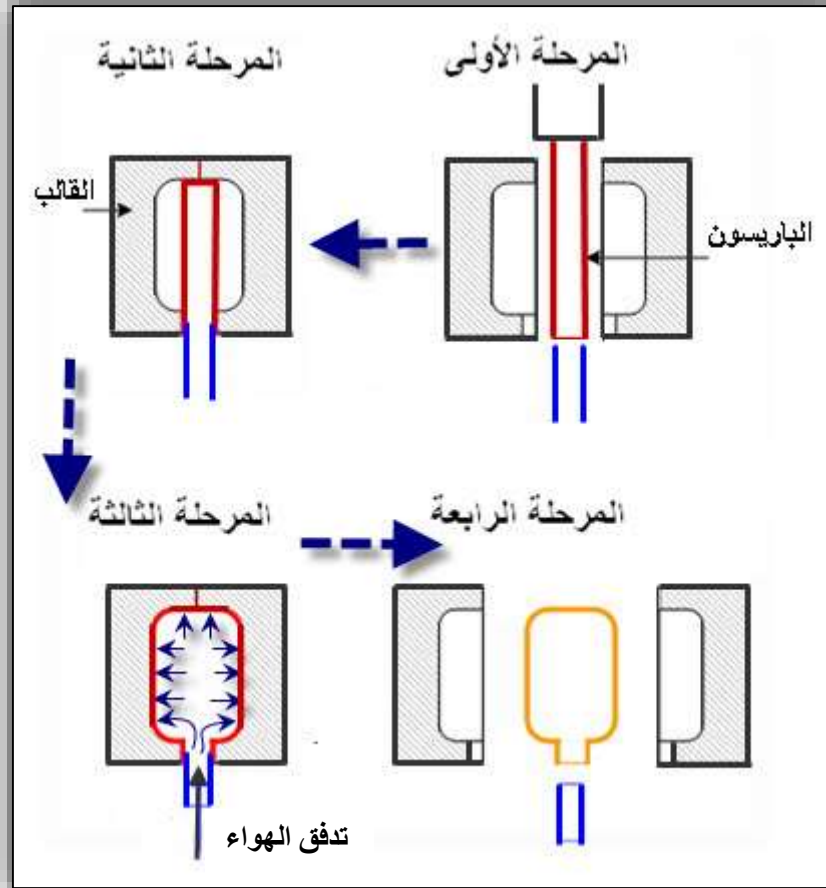
1. يبتق الباريسون عمودياً بالاتجاه الأسفل بين نصفي القالب.
 2. عندما يبلغ طول الباريسون الطول المطلوب، فإن نصفي القالب سيغلقان سوية مؤديان الى قرص الجزء العلوي للباريسون وإحكام غلق النهاية السفلى للباريسون على أنبوب النفخ.
 3. يتم نفخ الباريسون بالهواء عن طريق أنبوب النفخ الذي يكون موقعه في الأسفل، مؤدي ذلك الى تمدده وأخذه لشكل فجوة القالب. يتم بعد ذلك قص الباريسون من الأعلى.
 4. يبرد القالب ويُفتح نصفي القالب ويتم إخراج المنتج النهائي.
- ويمكن أن تكون نسبة النفخ إلى غاية (1:6) لكن الشائعة الاستخدام هي (1:3). تشبه العملية هذه، تشكيل القناني في الصناعات الزجاجية. الشكل (2-17) يوضح آلة تتألف من ثمانية محطات لعملية القولبة المستمرة لإنتاج القناني اللدائنية بعملية يطلق عليها عملية قرص-الأنابيب (Pinch-Tube Process). حيث يتم بثق أنبوب من مواد الترموبلاستيك من المُلدن إلى القالب المفتوح. و يتم قرص كل نهاية للأنبوب عند إغلاق القالب، ثم يزود بهواء مضغوط عن طريق الجزء المجوف منه بواسطة أنبوب قلبي يوضع في داخله. يؤدي الهواء المضغوط إلى حدوث تمدد الأنبوب اللدائني الذي يلامس السطح الداخلي لفجوة القالب. وبعد فترة تبريد قصيرة، يحافظ خلالها على ضغط الهواء، ثم يتم تحرير الضغط، فيُفتح القالب، وتُغذف القنينة، ويكون القالب جاهزاً لبدأ دور جديدة مرة أخرى. في بعض أنواع اللدائن، التي يجب أن تُبرد إلى درجة حرارة الغرفة، يُستخدم رشاش ماء. يجب تشذيب نهايتا القنينة لإزالة الزوائد، وليس هنالك حاجة إلى عمليات أخرى. يتم إعادة العملية باستمرار لكل ثمان قوالب.



شكل(2-14): مخطط لآلة قولبة النفخ بالبتق.

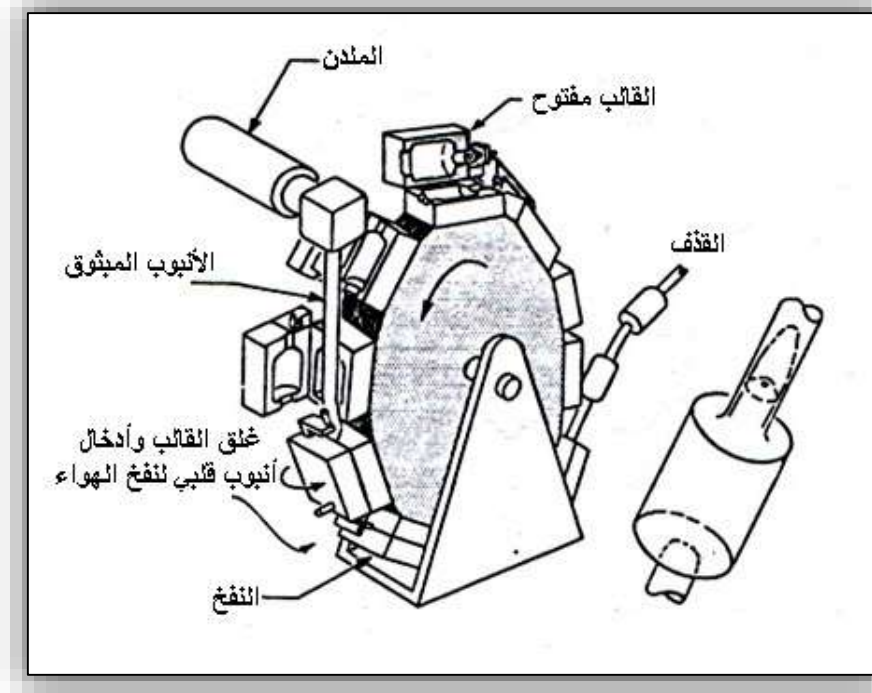


شكل(2-15) آلة قولبة النفخ بالبتق.



شكل (2-16): مراحل قولبة النفخ بالبتق.

من منتجات هذه العملية هي الحاويات الصلبة للمنظفات، علب الماكياج، القناني المرنة التي يمكن ضغطها. يمكن استخدام غالبية مواد الترموبلاستيك في القولبة بالنفخ، ويمكن إنتاج أشكال اسطوانية بحجم (50 جالون).



شكل (2-17) عملية الأنبوب المستمر لصناعة الحاويات اللدائنية.

من أهم عيوب هذه الطريقة هي عدم القدرة على الحصول على سمك متجانس لمختلف الجدران، نتيجة لاختلاف تمدد أجزاء المنتج. كذلك من الصعب زيادة سمك الجدران للأضلاع أو المساند. وكذلك فإن المساحة المنفوخة سوف لا تظهر لمعان عالي نتيجة لانخفاض الضغط في القالب الذي سوف لا يتجاوز (700 kPa). تعتبر عملية القولية بالنفخ من العمليات السريعة والسهلة الأتمتة. تكلفة القوالب المستخدمة بهذه الطريقة هي نصف إلى خمس تكلفة القوالب المستخدمة في آلة الحقن، لأنها لا تحتاج إلى قلوب، مجاري، وبوابات.... الخ. الشكل (2-18) يبين بعض أنواع منتجات آلات القولية بالنفخ.

2-8-2 قولبة النفخ بالحقن (Injection Blow Molding)

في هذه الطريقة سيتم صنع الباريسون بواسطة حقن الراتنج في قالب حقن ساخن حول أنبوب النفخ أو حول قضيب قلبي (Core rod). ثم يتم بعد ذلك إزالة أنبوب النفخ مع الباريسون من قالب الحقن وينقل إلى قالب النفخ. ان العمليات التي تلي ذلك ستكون مشابهة لتلك التي تستخدم بقولبة النفخ بالبتق.



شكل (2-18) منتجات القولبة بالنفخ

ان قولبة النفخ بالحقن هي طريقة أكثر دقة ويمكن التحكم فيها بطريقة أفضل بالمقارنة مع تقنية قولبة النفخ بالبتق. فهذه الطريقة ستسمح لنا بإنتاج منتجات أكثر تعقيداً ولأنواع عديدة من اللدائن. ولكن من عيوبها هو معدل إنتاجها القليل بالمقارنة مع قولبة النفخ بالبتق.

2-8-3 قولبة النفخ بالمط (الشُد) (Stretch Blow Molding)

وهي طريقة مشابهة لقولبة النفخ بالحقن، فهي تتضمن قولبة الباريسون بالحقن، ثم شده الى الأسفل على شكل أنبوب نفخ. ويُنفخ الباريسون المتمدّد بعد ذلك في قالب النفخ. سنحصل في هذه الطريقة على توجيه ثنائي المحاور لسلاسل البوليمر. ان هذا التوجيه السلاسل النوعي سيمنح المنتج زيادة في الصلابة الميكانيكية والجماءة والشفافية.

من المواد الشائعة الاستخدام في هذه الطريقة هي البولي أثيلين تيريفتاليت . تستخدم هذه التقنية لإنتاج حاويات المشروبات المكرّبة (الغازية).

2-9 تشكيل الأفلام و الصفائح (Film and Sheet Forming)

إن الطرائق الأساسية لإنتاج الأفلام أو الصفائح الرقيقة هي الرزمنة (Calendering) (الشكل 2-20)، البثق، النفخ والسباكة. يعتمد اختيار الطريقة المناسبة على نوع راتنج

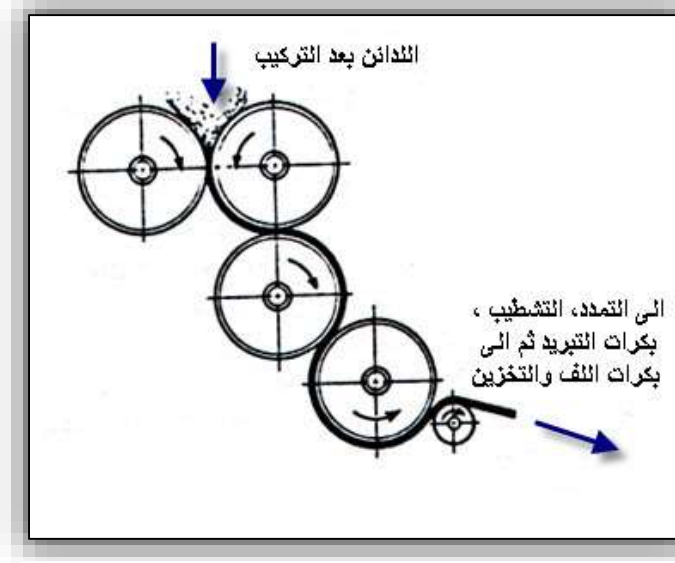
الثرموپلاستيك المختار، بالإضافة إلى الخواص المطلوبة للمنتج. ان الرزومة هي تكوين صفائح رقيقة بواسطة عصر المادة الثرموپلاستيكية بين درافيل، كما مبينة في الشكل (2-21). تتألف المواد من الراتنج، المُلدن، الحشوات وصبغات الألوان، التي تُركب وتُسخن قبل أن تُغذى إلى الرزومة. يعتمد سمك الصفيحة المنتجة بهذه الطريقة على الفراغ بين الدرافيل التي تعمل على تمدد اللدائن. قبل عملية لف الفلم، يتم تمريره خلال درافيل مُبردة بالماء. الفينيل، البولي أثيلين، أفلام أسيتات السليلوز والصفائح و البلاط الأرض الفينيلي هي من منتجات الرزومة.



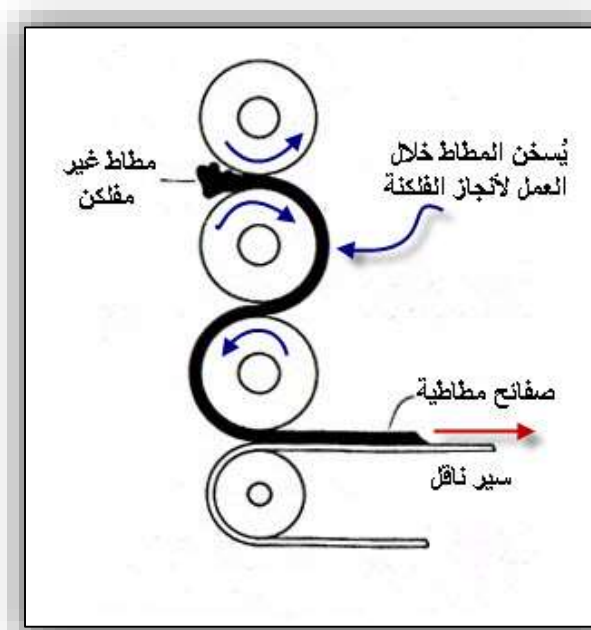
شكل (2-20) آلة الرزومة .

تستخدم نفس العملية لدرفلة المطاط الغير الناضج (الغير المغلفن) لمخازن صناعة الإطارات كما مبيين في الشكل (2-22).

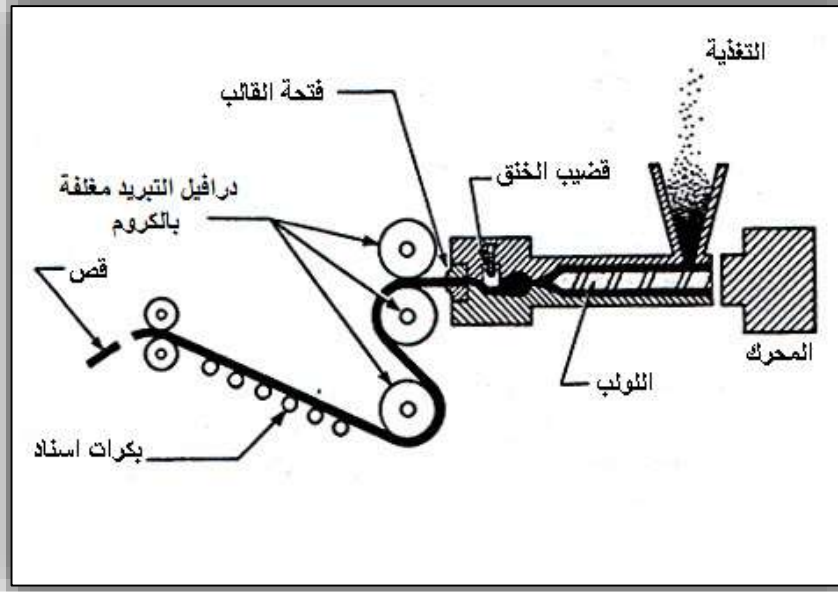
تستخدم عملية القولية بالبتق في تصنيع صفائح البولي أثيلين، البولي بروبيلين، البولي ستيرين أو (أي بي أس) (أكريلونائترال-بيوتيدين-ستيرين) (ABS)، الشكل (2-23) يبين رسم تخطيطي لهذه العملية. فبعد أن تُركب المواد، يتم وضعها في القادوس. تُسخن إلى درجة حرارية لا تتجاوز (315 °C) و تُجبر بالدخول



شكل (2-21) تشكيل الأفلام باستخدام عملية الرزمة.



شكل (2-22) التشكيل بالرزمة لإنتاج صفائح مطاطية.



شكل (2-23) بثق الصفائح الرقيقة والأفلام.

إلى مساحة القالب عند ضغط يتراوح ما بين (14 - 28 MPa) بواسطة اللولب. ويمكن التحكم بسمك الصفيحة بالتوافق بين فتحة القالب وقضيبة الخنق (Choker Bar). بعد عملية البثق، تمرر الصفيحة خلال دراويل مغلقة بصفائح الكروم حيث تُبرد بالزيت أو الماء قبل عملية تقطيعها إلى الأحجام المناسبة. يُوصى بالتبريد بالزيت لأن درجة الحرارة يجب أن يحافظ عليها عند حوالي (120°C)، للإنتاج الجيد. ان الصفائح المنتجة بهذه الطريقة يتغير سمكها ما بين (0.03 - 3.18 mm).

في سباكة الأفلام، يذاب الراتنج في مذيب، ثم يُنشر على سير صقيل مستمر أو برميل كبير، حيث ينقل إلى الفرن لإزالة المذيب وللإنتاج. في عملية السباكة الخلوية (Cell Casting)، تصنع خلية من صفيحتين زجاجيتين صقيلتين، ويفصلان عن بعضهما البعض بمسافة بحسب السمك المطلوب، ثم توضع حشية (Gasket) عند حافتيهما حتى يتم احتواء سائل المونومير المُحفّز. ثم تُرفع درجة حرارة الخلية وذلك بعد وضعها في الفرن، حيث تبقى في داخله حتى يتم الإنتاج. تُستخدم تقنية السباكة الخلوية في إنتاج معظم صحنائف الأكريليك الشفافة.

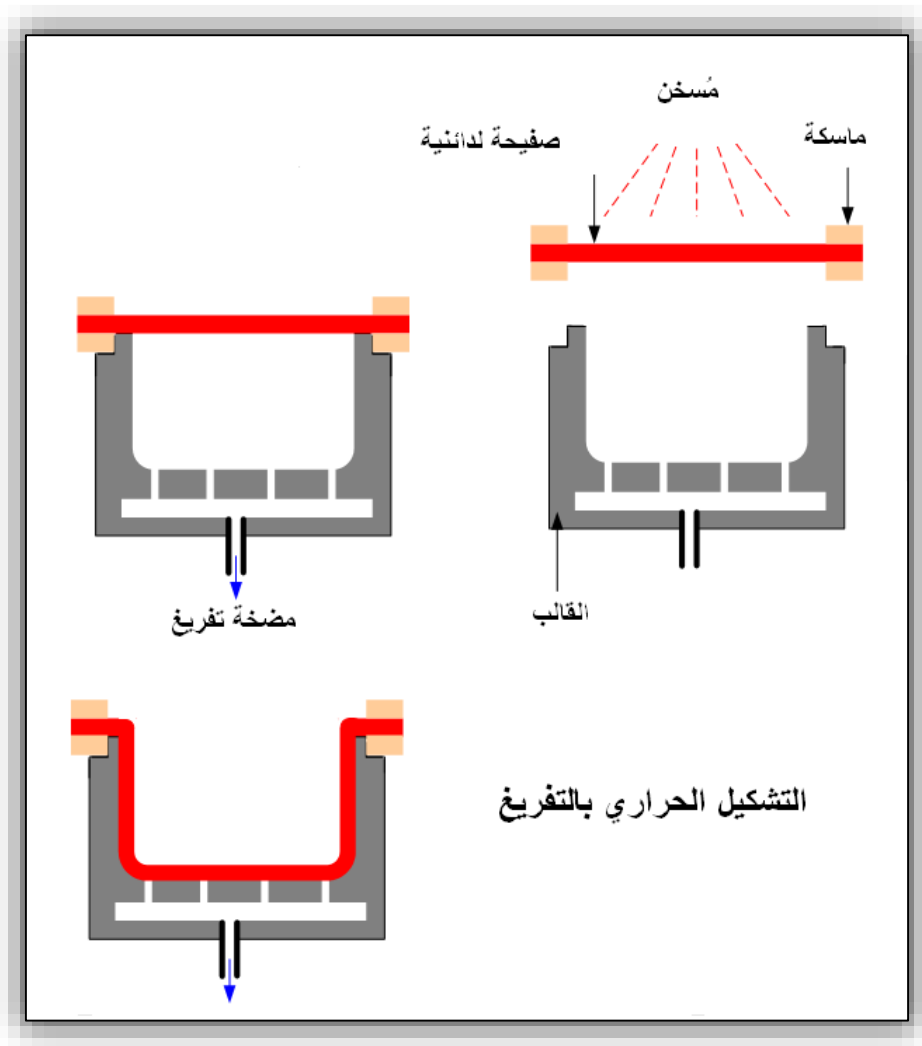
10-2 التشكيل الحراري (Thermofforming)

ان التشكيل الحراري هو عملية تشكيل صفيحة مستوية من الترموبلاستيك ويتضمن ذلك مرحلتين؛ في الأولى سيتضمن تليين الصفيحة بالتسخين؛ وفي الثانية تشكيلها داخل فجوة القالب. هنالك العديد من التقنيات التي تم تطويرها لتسليط الضغط على الصفيحة، وهي أما باستخدام ضغط هوائي متغير أو بطريقة ميكانيكية.

هنالك ثلاث طرائق تستخدم في التشكيل الحراري وتختلف فيما بينها في التقنية المستخدمة في مرحلة التشكيل.

1-10-2 التشكيل الحراري الفراغي (Vacuum Thermoforming)

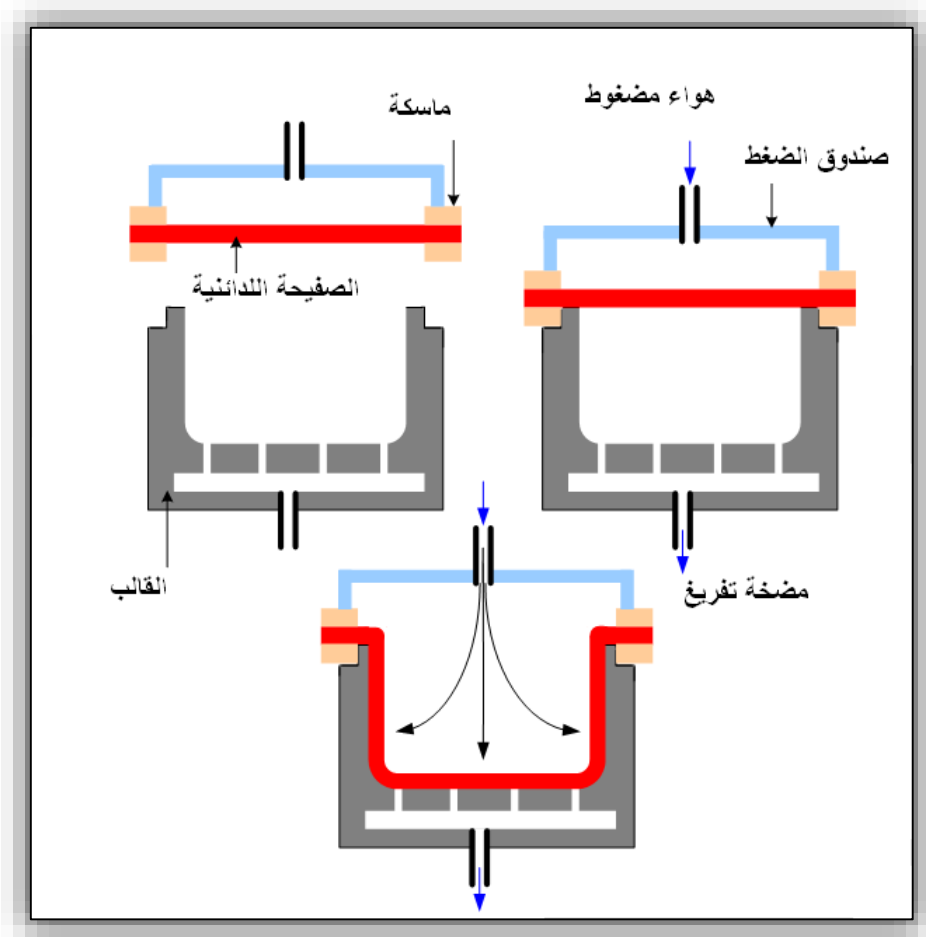
وفي هذه الطريقة يتم تشكيل صفيحة مُسخنة مُسبقاً من لدائن الترموبلاستيك باستخدام الضغط الفراغي وذلك في مجال قرب فجوة القالب، كما مبين في الشكل (2-24). حيث سيعمل الضغط الجوي على تسليط قوة على الصفيحة مؤدياً ذلك الى تشكيلها ضمن فجوة القالب. وعندما ستكون الصفيحة في تماس مع جدران القالب ستبرد وتتصلب.



شكل (2-24) خطوات التشكيل في تقنية التشكيل الحراري الفراغي.

2-10-2 التشكيل الحراري بالضغط (Pressure Thermoforming)

وهذه الطريقة تتضمن تشكيل صحيفة من الثرموبلاستيك باستخدام هواء مضغوط، حيث سيعمل ضغط الهواء على تشكيل الصحيفة بحيث تأخذ شكل فجوة القالب، شكل (2-25). عندما ستلامس الصحيفة سطح فجوة القالب ستبرد وتتصلب.

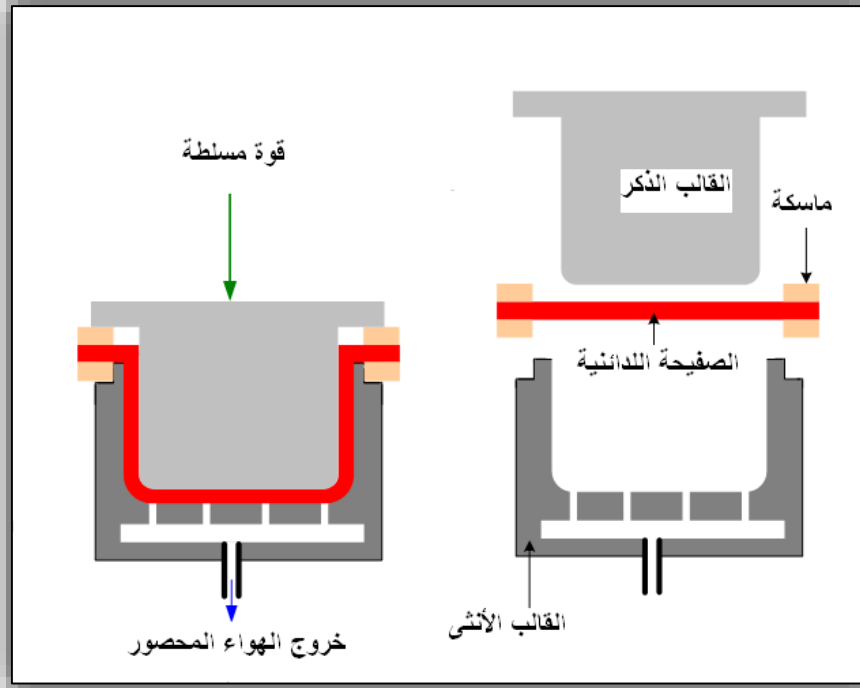


شكل (2-25) مراحل تقنية التشكيل الحراري بالضغط.

3-10-2 التشكيل الحراري الميكانيكي (Mechanical Thermoforming)

وفي هذه التقنية يتم تشكيل صحيفة لدائنية مُسخنة مسبقاً وذلك بواسطة قوة ميكانيكية مباشرة، شكل (2-26). حيث يستخدم القالب الذكر لإجبار مليء الصحيفة المتلينة للفراغ بين القالب الذكر والقالب الأنثى.

ان هذه الطريقة ستزودنا بسماحات بعدية دقيقة وبتفاصيل دقيقة أيضاً.



شكل (2-26) مراحل تقنية التشكيل الحراري الميكانيكي.

من المواد اللدائنية التي يمكن تشكيلها بتقنيات التشكيل الحراري هي:

- ❖ البولي بروبلين (PP)
- ❖ البولي ستيرين (PS)
- ❖ البولي فينيل كلورايد (PVC)
- ❖ البولي أثيلين المنخفض الكثافة (LDPE)
- ❖ البولي أثيلين العالي الكثافة (HDPE)
- ❖ أسيتات السليلوز
- ❖ البولي مثيل ميثا أكريليت (PMMA)
- ❖ الأكرولانيت-بوتيدين-ستيرين (ABS)

يستخدم التشكيل الحراري بصورة واسعة في صناعة تغليف المواد الغذائية وحاويات المتلجات والألبان وفي صناعة صواني اللحم المستخدمة في المايكروويف وتغليف السندوتشات.... الخ. تستخدم هذه التقنية كذلك في صناعة الأدوات الكهربائية والصيدلانية والغدد الصغيرة والمثبتات والألعاب وهياكل القوارب والمركبات.

11-2 عمليات تشكيل المطاط (Rubber Processes)

يتألف المطاط الخام من جزيئات طويلة وزنها الجزيئي كبير جداً لذلك تكون أشبه بالناض و تقاوم عمليات التشكيل. فلكي نتمكن من قولبة وتشكيل المطاط يجب علينا تكسير هذه الجزيئات. لهذا الغرض يتم بثق المطاط الخام في مطواع (Plasticator) ثم يُعجن (masticated) بواسطة دوران المخفقة (Beaters) في خلاط بانبري (Banbury Mixer)، أو يُلدن بين الدرافيل في مطحنة المطاط (Rubber Mill). الأخيرة ربما تتجز بوحدها أو بعد الأولى أو كلا المعالجتين الآخرين. في طاحونة المطاط (شكل 2-27)، يُضغط المطاط بين درفيلين يدوران إحداهما باتجاه معاكس للأخر عند المدخل. حيث ان احد هذه الدرافيل سيدور أسرع من الثاني بنسبة قد تصل إلى (1:3)، وهذا سيُعرض القص المتعدد والتأثير الانضغاطي على المطاط. الصحيفة الخارجة من درافيل المطحنة ستعاد تغذيتها لفترة زمنية محددة إلى الخلاط لطحنها. حيث سيتم في الخلاط والمطحنة تغميس المطاط بالمواد المضافة للحصول على المنتج النهائي. حيث تستخدم هنا طرائق عديدة مشابهة للعمليات التي تستخدم في قولبة بعض أنواع اللدائن، و أحد هذه الأمثلة هي الرزومة والتي تستخدم للحصول على صحائف الفينيل المستخدمة في الديكورات و الأفلام. إن غالبية المطاط الاصطناعي (الإلاستومرات) لا يستجيب إلى العجن أو التشكيل ويجب أن يُرگب لكي يستجيب لذلك.

المرحلة الثانية هي قولبة أو تشكيل المطاط بالشكل المطلوب ثم فلكنته. غالباً ما يكون الكبريت هو العنصر المُفلكن للحصول على الروابط المستعرضة بين جزيئات المطاط. وهذا ما سيجعل المطاط مرناً، غير دبق، قوي، ومقاوم أكثر للحرارة والمذيبات. ان بنية معظم المطاط الاصطناعي يتم تنظيمها خلال عملية البلمرة ولا تتم فلكنته. ان عمليات القولبة والتشكيل الحقيقية تنجز بطرائق مختلفة وهي مشابهة للطرائق الشائعة للمواد اللدائنية، فيمكن بثق المطاط أو ضغطه أو حقنه في قوالب وتشكيله.

هنالك العديد من التقنيات التي تستخدم لمركبات الترموبلاستيك التي يمكن استخدامها كذلك في تشكيل المنتجات المطاطية. الجدول (2-1) يعرض مختصراً للطرائق الأربع الشائعة الاستخدام.

جدول (1-2) عمليات تشكيل المطاط.

محدداتها	محاسنها	الطريقة
<ul style="list-style-type: none"> - من الصعب الحصول على سماعات قريبة - يجب إزالة الزوائد - صعب الحصول على التعقيدات الشديدة - معدل الإنتاج بطيء. 	<ul style="list-style-type: none"> - نهاية أسطح جيدة - يمكن صنع الأجزاء في أية صلادة، شكل، وحجم - نسبياً قليلة التكلفة - الزوائد قليلة - مناسبة للعديد من المركبات. 	<p>القولبة الإنضغاطية: تضاف كمية زائدة من المركب غير الناضج إلى فجوة القالب: يغلق القالب ويُسلط ضغط مع حرارة، مُجبراً المركب بالقوة على ملأ فجوة القالب: الحرارة ستُنضج المركب (الفلكنة) ويفتح القالب ويزال الجزء المتصلب.</p>
<ul style="list-style-type: none"> - كلفة القالب العالية - ليست مناسبة لجميع المركبات - خسارة كبيرة بالمواد بسبب المصب، القنوات والبوابات. 	<ul style="list-style-type: none"> - أبعاد المنتج دقيقة - ليس هنالك حاجة لإزالة الزوائد - جيدة للأشكال المعقدة - إنهاء جيد ومتجانس - معدل الإنتاج عالي. 	<p>القولبة الانتقالية والحقن: تشبه القولبة الإنضغاطية، عدا أن القالب يُغلق فارغاً ويتم إجبار المطاط بالقوة على الدخول عن طريق المصب والقنوات والبوابات.</p>
<ul style="list-style-type: none"> - صعب الحصول على التسامحات القريبة - ممكن فقط إنتاج المقاطع المتجانسة (على الطول) - الفتحة يجب أن تكون باتجاه البثق. 	<ul style="list-style-type: none"> - كلفة التشغيل منخفضة - أنواع عديدة من الأشكال المعقدة يمكن إنتاجها - معدل الإنتاج سريع. 	<p>البثق: مماثل لبثق اللدائن حيث أن المادة المُسخنة تجبر بالقوة في المرور من فتحة القالب التي تعطي شكل المقطع المطلوب. لكن الفلكنة لا تأخذ دورها في فجوة القالب: يتم إنضاج الأطوال المبتوقة في المفلكن البخاري وأما يستخدم كما هو أو يُقطع إلى أجزاء</p>
<ul style="list-style-type: none"> - سمك الأجزاء محدود جداً - مناسبة فقط للأجزاء المسطحة. 	<ul style="list-style-type: none"> - مناسبة لأي مادة مطاطية - قليلة التكلفة - اقتصادية للأجزاء الصغيرة. 	<p>قالب القطع: يتم ختم الأجزاء أو قطعها بأشكال من الصفائح المفلكنة أو تسطحها باستخدام قوالب من الصلب عالية التكلفة.</p>



شكل (2-27) طاحونة خلط المطاط

12-2 تشغيل اللدائن (Machining Plastics)

ان القولبة والتشكيل هما الطريقتان الشائعتان في صناعة الأجزاء اللدائنية، إلا انهما يتطلبان قوالب وآلات تشكيل عالية التكلفة. التشغيل من الأشكال القياسية ربما سيكون اقل كلفة للكميات و الأحجام الصغيرة: لقد تم الإشارة إلى نقطة التوزيع المتعادل (Break-Even Point) ستكون لغاية (15,000 – 60,000) قطعة باستخدام الآلات الذاتية التشغيل (المؤتمتة). ان بعض الأجزاء يمكن إنتاجها بطريقة اقتصادية أفضل بواسطة عملها كشرائح ومن ثم بثقها للحصول على الشكل المطلوب. ان الأشكال التي يصعب تشكيلها، كأسنان اللولب (Threads) والأبعاد التي سماحاتها قليلة، يمكن الحصول عليها غالباً وبكلفة قليلة بالتشغيل. ان بعض عمليات القطع هي لإزالة المواد الزائدة على شكل زوائد (Flash)، قنوات التغذية (Runners)، مصبات (Sprues)، وحافات ناتئة (Flange)، الخ، تجرى على غالبية الأجزاء اللدائنية المنتجة بالقولبة و التشكيل.

ويمكن استخدام غالبية التقنيات والمعدات التي تستخدم للمعادن، في تشغيل اللدائن إلا أن هنالك بعض أساسيات التشغيل التي تطبق على اللدائن وحدها، نتيجة لاختلاف خصائص اللدائن عن المعادن. ونتيجة لوجود أنواع عديدة من اللدائن، فهناك مواصفات كثيرة لقطع اللدائن. الشيء المهم الذي سنركز عليه هو الأساسيات التي توضح كيفية ولماذا يجب معاملة اللدائن بصورة مختلفة عن المعادن عند إجراء عمليات القطع. هذا ما سوف نناقشه هنا.

إن خصائص اللدائن التي ستحدد قابليتها للتشغيل هي:

1. الموصلية الغير جيدة للحرارة ولكنها تتأثر بسهولة بالحرارة.
2. بعضها يحتوي على حشوات من مواد حاكة (Abrasives Fillers)
3. غالبيتها تمتلك خاصية الليونة والخضوع (Yielding)
4. بعضها هش (Brittle) و لين.

ان مواد الترموبلاستيك تتلين و تفقد شكلها و تصبح على شكل مادة صمغية (Gummy)، تعرقل أداة القطع، بينما مواد الترموستنك تتدهور وتتفحم (char) عند درجات الحرارة العالية. ان الحرارة المتولدة أثناء عملية القطع لا تنتشر بعيداً وبسرعة إلى جميع أجزاء المادة اللدائنية، لذلك ستعتمد النتائج الجيدة على الخبرة العملية في تبريد عملية القطع، والتي سينتج عنها قطعاً جيداً و سطحاً صقيلاً. في عمليات النشر (Sawing)، يفضل استخدام المنشار الشريطي على الدائري، لأن أسنان المنشار الشريطي ستمتلك وقتاً أطول للتبريد. ان موائع التبريد (Coolants) الشائعة الاستعمال هي الهواء، الماء، وزيت التبريد.

في حالة تشغيل المواد اللدائنية التي تحتوي على حشوات عالية الصلابة (مركبة)، ستبلى (Wear) أدوات القطع بسرعة أكبر، لذا سيتطلب منا استخدام عدد القطع المصنوعة من الكريبد المسمنت (Cemented Carbide)، الأوكسيد الملبّد (السيراميك الأوكسيدي)، أو حتى من الماس. ويجب اخذ الحذر عندها لتجنب كسر الألياف المقوية لللدائن في المواد المركبة. ان استخدام السرعات العالية للقطع لأغلب اللدائن سيكون مناسباً لأن موادها لينة. كما في حالة أشكال عدة القطع، سنحتاج إلى زاوية قطع مُفرجة (Obtuse Cutting Angle) لمنع حفر عدة القطع لسطوح اللدائن، كما نعمل ذلك مع تشغيل البراص (Brass) و النحاس. في الحقيقة، هنالك قانون عملي شائع يستخدم لضبط عملية قطع اللدائن كما في النحاس والبراص إذا لم تتوفر المعلومات المطلوبة. حيث تجرى عملية الضبط بالمحاولة خلال العملية للوصول إلى أفضل الظروف.

يمكن للتشغيل بالقطع أن يعمل بسماحات قليلة في قطع اللدائن، لكن في اغلب الحالات ستكون السماحات القليلة غير مجدية لأن اللدائن لا تحافظ على حجمها. حيث تخضع العديد من المواد اللدائنية ويتغير حجمها بصورة ملحوظة تحت تأثير عمليات القطع. حيث ان بعضها يمتص الرطوبة بالإضافة إلى حدوث الانتفاخ (Swell) فيها. في بعض الحالات يتم تبريد (تبريد إلى درجات منخفضة جداً) اللدائن حتى تتحول إلى مادة جاسئة (Rigid) من اجل انجاز عملية القطع.

وبعض أنواع اللدائن يكون هشاً وينتج عنه الرائش (Chip) بطواعية، عند إجراء عملية القطع عليه. ان القص هو العملية الشائعة التي تُجرى باستخدام القوالب الصغيرة أو القواطع الحاكمة (Rule Cutters). في بعض الحالات يتم تسخين اللدائن قبل قطعه.

13-2 المنتجات اللدائنية الخاصة (Special Plastic Products)

وتشمل هذه مواد الطلاء كالدهان والمواد اللاصقة، الألياف، الأفلام (الأغشية) والمواد الرغوية.

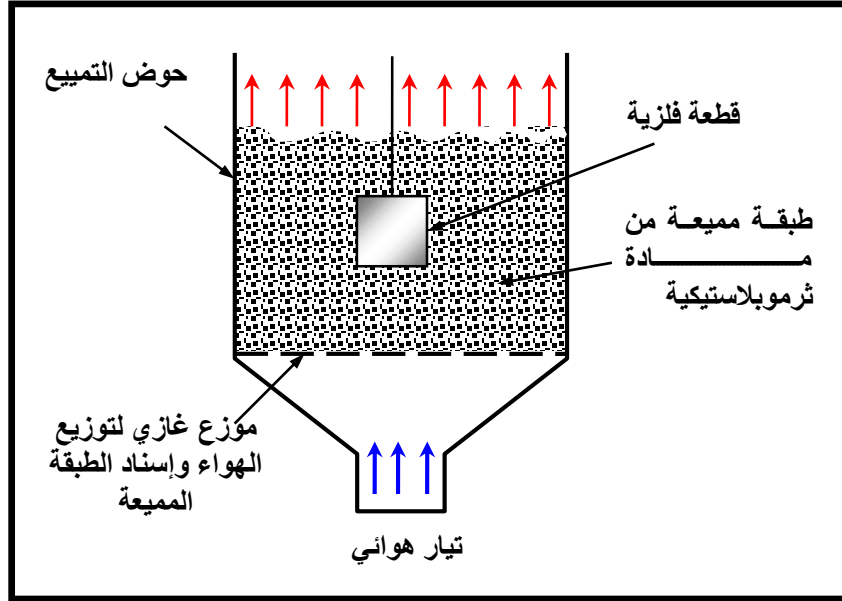
1) مواد الطلاء (Coating Materials)

هنالك صنفان واسعان من مواد الطلاء، اعتماداً على ما اذا كانت المادة الملدنة ستستخدم لحالها أو مذابة في مخفف سيتبخّر بسرعة بعد عملية الطلاء.

ان إحدى هذه الطرائق المستخدمة هي الطلاء باستخدام الأحواض المميعة (Fluidized Bed Coating). في هذه الطريقة ستميع طبقة سميكة من حبيبات أو مسحوق المادة اللدائنية وغير الساخنة بواسطة تيار هوائي يؤدي الى سلوكها سلوك المائع. ثم يتم غمر القطعة الفلزية المراد طلاؤها بعد تسخينها لفترة معينة من الزمن، كما مبين في الشكل (2-28). وبهذه الطريقة

تلتصق طبقة من المادة اللدنة بالقطعة الفلزية وتنتشر فوق سطحها. يعتمد سمك طبقة الطلاء على الوقت المستغرق في غمر القطعة الفلزية في الحوض ودرجة حرارتها والى حد ما نوع الفلز المستخدم.

تناسب هذه الطريقة لدائن الترموبلاستيك ومن الممكن استخدامها مع اللدائن من نوع الترموستك إذا تم التحكم بدرجة الحرارة للقطعة الفلزية لتوليد تفاعل الترموستك.



شكل (2-28) عملية الطلاء بواسطة حوض التمييع.

من الأمثلة الجيدة للنوع الآخر للطلاء (الطلاء الحاوي على مذيب) وهو الطلاء المستخدم في طلاء أبدان السيارات، حيث تحتوي مادة الطلاء هذه على راتنج الأكريليك في مذيب مُخفف (Thinner) الذي يتبخر بسرعة بعد إنجاز عملية الطلاء. عند اختيار اللدن يجب ان تزيد درجة حرارة تحوله الزجاجي (T_g) قليلاً على درجة حرارة الغرفة لكي لا تكون طبقة الطلاء المتكونة طرية جداً. فإذا ارتفعت (T_g) أكثر فعندها لا تتمكن طبقة الطلاء من التكيف لتمدد الفلز وتقلصه عند تغير درجة الحرارة مؤدياً ذلك الى تشقق طبقة الطلاء.

(2) المواد اللاصقة (Adhesive Materials)

يمكن تصنيف هذه المواد على النحو التالي:

1. المواد دائمة السيولة
2. المواد التي تتصلب بتأثير العمليات الفيزيائية
3. المواد التي تتصلب بتأثير العمليات الكيميائية.

من الأمثلة على النوع الأول هو الشريط الشفاف اللاصق والذي يسبب الترابط هو وجود مادة دائمة السيولة تلتصق بشريط السيلوفان الذي يلتصق بالضغط على الورق أو السطوح الأخرى. ولكي يعمل هذا النوع من المواد اللاصقة يجب أن يُرطَّب السائل لتكوين روابط قوية. من الأمثلة على النوع الثاني للمواد اللاصقة هو شمع الأختام الذي يستخدم ساخناً ثم يتصلب، أما الأمثلة على النوع الثالث فهو الأيبوكسي وهو ثرموستك، حيث يمزج الراتنج السائل مع معجل التصليد (Hardener) الأميني ثم يستخدم المزيج قبل تصلده بفعل التفاعل الكيميائي.

(3) الألياف (Fibres)

تنتج الألياف من مواد لدائنية كالأكرلك، أسيات السليلوز، البولي يورثين، التفلون، النايلون والأوليفينات (البولي أثيلين والبولي بروبيلين) ... الخ. إحدى التقنيات التي تستخدم في صنع الألياف الصناعية هي ببتق البوليمر المصهور من خلال قالب ثم يحول إلى شُعيرة (Filament) بفعل التبريد. بعد تصلب الشعيرة يتم سحبها عند درجة حرارية بين (T_g) و (T_m) لتوجيه السلاسل بالاتجاه المفضل.

(4) عملية تصنيع الحبال

إحدى العمليات التي تستفيد من صناعة الألياف هي عمليات صناعة الحبال، حيث تمر عملية الانتاج بثلاث مراحل، كل مرحلة تكون منفصلة عن الأخرى وجميعها موضوعة بحسب الترتيب. في المرحلة الأولى يتم وضع المادة اللدائنية في قادوس كبير والذي بدوره يكون متصلاً



شكل (2-29) آلة بثق لصنع الحبال اللدائنية.

في الخزان وعند تشغيل بخزان كبير بواسطة شفاط لنقل المادة اللدائنية من القادوس الى الخزان. و تبقى المادة اللدائنية الآلة فانها ستسحب الكمية المطلوبة من اللدائن. وبعدها نصل الى الخطوة الثانية وهي عملية الخلط حيث يتم فيها خلط الصبغة مع المادة اللدائنية باستخدام خلاط، واطافة مادة مساعدة أو مقوية لتعزز من مقاومة الشد. بعد خلط المواد في الخلاط يتم امرها بالاسطوانة التي تسخن بشكل متصاعد وتدرجي الى درجة حرارة تتراوح ما بين (150° - 200°)C، و عندها تكون المواد المختلطة قد انصهرت. تثق بعدها عبر قالب يتألف من ثماني فتحات، تحتوي كل فتحة على (20) فتحة صغيرة وظيفتها زيادة الأستطالة، تمر بعدها في سوائل التبريد (الماء) ومن ثم عبر مسخنين حرارتهما من (50° - 60°)C، لتساعد في تمدد الشعيرات. وبعد ذلك تمر على ثلاث مجففات وهي على هيئة أسطوانات تزيد من قوة الحبال على تحمل قوة السحب. تصل بعد ذلك الى الخطوة الاخيرة وهي عملية لفها حول أسطوانات ليتم تحويلها الى المرحلة الثانية والتي تسمى بمرحلة الغزل.

في هذه المرحلة (مرحلة الغزل) يتم فيها زيادة قطر الحبال، فأما أن تكون فردية أو زوجية، فعندما تكون فردية تستخدم أسطوانة واحدة وأما إذا كانت زوجية فتستخدم أسطوانتين. وتستخدم في هذه المرحلة آلة ذات خطوة واحدة حيث تلف في النهاية الحبال على هيئة بكرات لتنتقل بعدها الى المرحلة الثالثة والأخيرة. في هذه المرحلة يتم تحديد القطر المطلوب والذي غالباً ما يكون ما بين (6-14 mm) وحسب ما يرغب فيه، حيث ان زيادة عدد البكرات تؤدي الى زيادة السمك، والآلة المستخدمة في صناعة الحبل مبينة في الشكل (2-29).

(5) الأفلام أو الأغشية (Films)

تصنع الأفلام عادة بطريقة القولبة بالبتق (Extrusion) خلال قالب ثم يمرر المنتج وهو مازال في الحالة المرنة خلال سلسلة من الدرافيل الصقيلة لتوجيه السلاسل بالسحب. وتستخدم في نطاق واسع كاستخدامها في التغليف وصناعة الأكياس وغيرها من المنتجات.

(6) الرغويات (Foams)

تعتبر الرغويات من المنتجات المهمة والتي تستخدم لأغراض العزل والتبطين (التحشية). فالرغوة هي عبارة عن بوليمر يحتوي على خلايا غازية تكون بنوعين مفتوحة ومغلقة محاطة بجلد أملس. المفتوحة تزيد من أسفنجية البوليمر وقدرته على العزل كما في مقاعد السيارات. أما الرغويات ذات الخلايا المغلقة فهي منتجات مرغوب فيها كما في صداري النجاة ومواد تغليف الأجهزة الكهربائية.

يتم صناعة رغويات اللدائن المسامية (Cellular Plastic Foams) بواسطة تمدد الراتنجات ميكانيكياً أو كيميائياً. حيث ان بنيتها ستزودها بخواص عزل حرارية، قابلية الطفو في الماء (Buoyancy)، ملطف الحركة (كالأسفنج) (Cushioning)، وخفة الوزن. أن نسبة المقاومة إلى الوزن يمكن أن تكون من (2 الى 5) مرات عما في المعادن المستخدمة في صناعة الهياكل. يمكن صناعة الرغويات لتكون مرنة أو جاسئة ؛ كثيفة (مغلقة) أو مفتوحة. من الممكن ان تشكل في مكان ما بواسطة رشها على مساحة معينة، ثم تتمدد (كما في الخزانات)، كما يمكن قولبتها، بثقها، وسباكتها، وهي متوفرة في المخازن بأشكال مختلفة.

من الممكن أن نجعل جميع أصناف اللدائن (ثرموستنك أو ثرموبلاستيك) كمواد لدائنية رغوية. وبالاعتماد على نوع المادة المستخدمة، فان الترغوي يتم بواسطة:

1. حقن غاز مضغوط في كتلة اللدائن اللينة؛
2. إضافة مذيب ذو درجة غليان منخفضة أو مواد كيميائية، تسخن بعدها لتحرر البخار أو الغاز؛
3. جعله مشبعاً بالغاز ميكانيكياً (Mechanical Aeration) أو يرغى (Frothing) بالخلط، التحريك (Stirring) ... الخ؛
4. تضمين مواد كيميائية مع المكونات الى اللدائن لتكون الغازات عند خلطها؛ و
5. خلط دقائق معدنية صغيرة وغاز مع الكتلة اللدائنية تحت تأثير الضغط لتسبب تكون الفقاعات حول الدقائق المعدنية عند تحريرها من الضغط.

أسئلة الفصل

1. صف قولبة اللدائن بالكبس وهل تصلح هذه الطريقة لكل أنواع اللدائن؟ ولماذا؟
2. قارن بين القولبة بالكبس والقولبة الانتقالية؟
3. صف عملية القولبة بالحقن وما هي أشكال المنتجات التي يمكن الحصول عليها باستخدام هذه الطريقة؟
4. كيف يتم سباكة البوليمرات. ما هي الخواص التي يجب ان تتوفر في المواد المتبلمرة؟ هل تصلح لكل أنواع اللدائن؟
5. ما الميزة التي تمتلكها تقنية القولبة بالبتق ولا تتوفر في بقية التقنيات؟
6. ما هي تقنية الإكساء بالبتق وما هي أنواع المنتجات التي يمكن إنتاجها باستخدام هذه التقنية؟
7. تعتبر القولبة الدوارة واحدة من التقنيات المهمة والتي تستخدم في قولبة اللدائن. ما الذي تتميز به هذه الطريقة؟ وما هي أشكال المنتجات التي يمكن الحصول عليها؟
8. ما الغرض من استخدام القولبة بالنفخ؟ وما الذي يميزها عن التقنيات الأخرى؟
9. ما هي الطرائق الأساسية لإنتاج الأفلام والصفائح الرقيقة؟ صفها باختصار؟
10. كيف تُشكل البوليمرات حرارياً؟ اذكر أهم التقنيات المستخدمة في ذلك، معزراً إجابتك بالرسم.
11. قارن بين تقنيات تشكيل المطاط المختلفة من حيث محاسنها ومساؤها؟
12. تعتبر تقنية قولبة النفخ بالبتق إحدى طرق التشكيل لللدائن، صف هذه الطريقة وما هي أشكال المنتجات التي يمكن الحصول عليها؟
13. ما هي الطرائق الرئيسية للحصول على الرغوات في اللدائن؟
14. ما هي الخصائص الأساسية التي تحدد قابلية اللدائن للتشغيل؟ عددها؟

الفصل الثالث

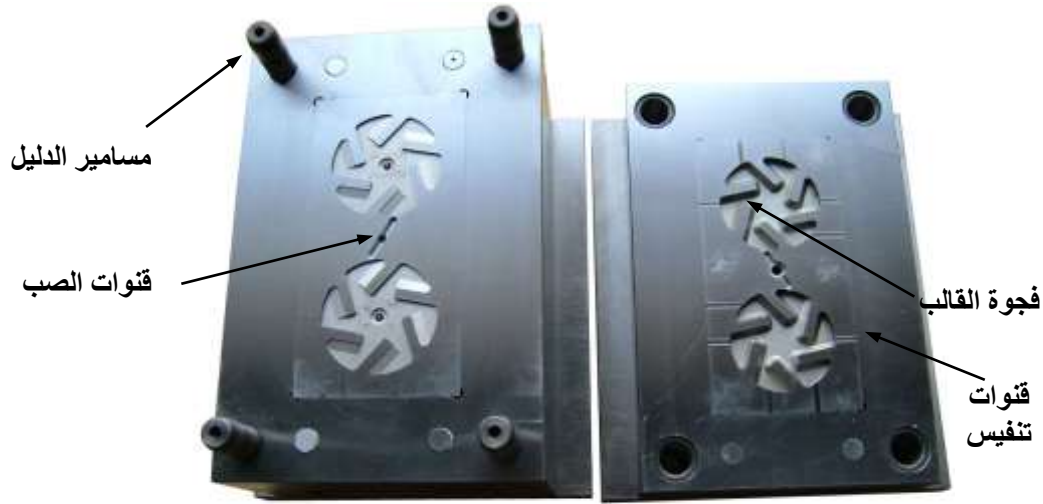
تصميم قوالب المنتجات اللدائنية

MOLD DESIGN FOR PLASTIC PRODUCTS

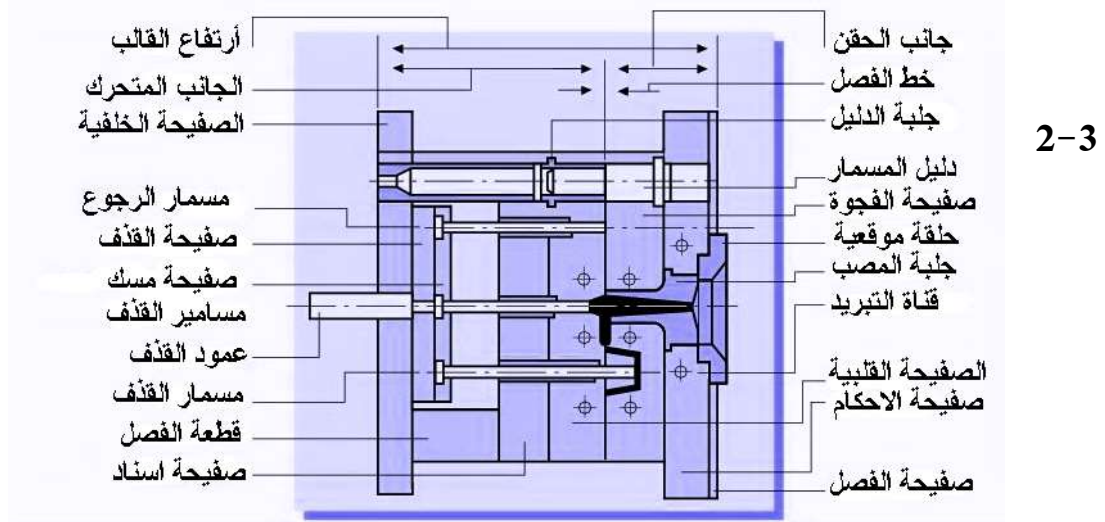
3-1 قوالب اللدائن (Molds For Plastic)

تصنع القوالب المستخدمة في عمليات التشكيل بالضغط والحقن من الصلب الكربوني المعالج حرارياً، شكل (3-1)، ويتطلب إنتاج مثل هذه القوالب استخدام آلات دقيقة. يُجهز قالب عادةً بمسامير قذف (Ejector Pins) كما مبين في الشكل (3-2)، تستخدم لقذف القطعة المنتجة (المقولة) من القالب. ويجب ان تكون هذه المسامير متمركزة في مناطق بحيث لا تترك أثراً مشوهاً واضحاً على القطعة المنتجة. تتصرف اللدائن كالمعادن، حيث أنها تتمدد بالحرارة وتنقلص بالبرودة، ويختلف مقدار الانكماش باختلاف المواد والطريقة المستخدمة للقولبة، لكنه عادةً يتراوح ما بين (0.003 - 0.009 mm) لكل (1 mm) أي (0.3% - 0.9%). تصنع قوالب اللدائن في الغالب من نصفين، النصف الأول يثبت على الآلة ويكون ثابتاً والنصف الثاني يثبت كذلك على الجزء المتحرك من الآلة ويتم الاتصال بين نصفي القالب بصورة محكمة عند البدء بعملية القولبة.

يجب ان تكون الفجوة (التي تمثل شكل الجزء المنتج) في موقع متمركز بالنسبة لنصفي القالب ويتم استخدام مسامير الدليل للمساعدة في تحقيق ذلك. ويتم عمل قنوات تبريد القالب في نصفي القالب، لكي تسمح بالحصول على تبريد منتظم في جميع أجزاء المنتج المقولب. بالإضافة الى ذلك يجب ان يحتوي القالب على قنوات دقيقة جداً لخروج الهواء المحصور.



شكل (1-3) قالب للقولبة بالحقن.



شكل (2-3) مقطع عرضي لقالب القولبة بالحقن.

الوظائف الأساسية للقالب

وتشمل هذه الوظائف ما يلي:

1-2-3 تشكيل المنتج

يتم إنجاز شكل المنتج بعد ملء تجويف القالب بالمادة الدائنية، والذي تكون أبعاده وشكله أكبر قليلاً من المنتج (للتعويض عن التقلص الذي سيحدث للمنتج بعد التبريد). فالأشكال إما أن تكون مربعة أو مستطيلة أو أسطوانية كالأوعية والأغطية التي عادةً ما تتطلب وجود قلب (Core) وفجوة يمكن تشغيلها، شكل (3-3). وينجز التشغيل باستخدام قطعة من الصلب، وذلك باستخدام آلات التحكم المبرمج بالحاسوب (CNC Machine) أو بواسطة التشغيل بالتفريغ الكهربائي (EDM).



شكل (3-3) قالب لمنتج لدائني

3-2-2 نقل المادة اللدائية من الآلة إلى فجوة القالب

حيث يقوم بنقل المادة اللدنة إلى فجوة القالب عن طريق منفث الماكينة (Nozzle) والذي يكون متصلاً بمصب القالب، الذي تمرر من خلاله اللدائن الساخنة إلى تجويف القالب لتكون شكل المنتج المطلوب.

3-2-3 إزالة الهواء المحصور من الفجوة أثناء التعبئة

ان التخلص من الهواء المحصور (بالتنفيس) من الأمور المهمة عند إدخال المادة اللدائية داخل القالب، حيث إنها لا تتم بنجاح ما لم يتم عمل قنوات تهوية لفجوة القالب وغالباً ما تكون هذه القنوات ذات أقطار صغيرة جداً بحيث تسمح بخروج الهواء المحصور. تتمكن حينها اللدائن من مليء فراغ فجوة القالب ونحصل على شكل المنتج المطلوب. ان الهواء المحصور أو أي غاز آخر سيتبع القانون البسيط التالي:

$$P_n \times V_n = C$$

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

حيث أن:

P: الضغط ، V: الحجم ، C: قيمة ثابتة.

و (V₁) حجم فراغ فجوة القالب مقاساً بالـ (cm³) عند الضغط الجوي (P₁) و ليس للهواء الداخل مسلك للخروج، وسيُدفع هذا الهواء بواسطة المادة اللدنة المتدفقة إلى الزوايا وسيُضغط حجمه إلى

(V₂). حينئذ سيصبح ضغط الهواء (P₂) والذي سيعيق مليء هذه الزوايا من القالب بالمادة اللدائنية.

أماكن قنوات التهوية يجب وضعها عند المناطق النهائية لانسياب اللدائن، وهذه القنوات لا يتم فتحها إلا بعد التأكد من حاجة القالب إليها بعد إجراء الاختبار على آلات القولبة.

3-2-4 تبريد اللدائن

ان أغلب الطاقة الحرارية التي تضاف إلى اللدائن من قبل آلات القولبة أو التشكيل هي لجعله مادة لينة وسهلة الانسياب، لكن هذه الحرارة يجب أن تُزال قبل فتح القالب وقذف المنتج. تدخل اللدائن آلات القولبة عند درجة حرارة الغرفة (T_R)، ثم تُسخن بعد ذلك داخل الماكينة إلى درجة حرارة التشغيل (T_O)، تُبرّد بعدها داخل القالب إلى درجة حرارة القذف (T_E). غالباً ما تكون درجة حرارة القذف (T_E) اكبر من درجة حرارة الغرفة (T_R) وفي أغلب الحالات تكون (T_R) في المدى (20-25 °C) بينما تكون (T_E) في المدى (50-80 °C). ويكون الفارق في درجات الحرارة بين مياه التبريد الداخلة إلى القالب والخارجة منه ما بين (5 °C - 3 °C)، وتكون هذه كافية لنقل الحرارة من القالب بكفاءة عالية وخاصة إذا كان تدفق مياه التبريد مضطرب جداً.

3-2-5 قذف المنتج

بعد تبريد المنتج يتم فتح القالب ويجب حينئذ قذف المنتج منه إما يدوياً أو آلياً والأخير هو الشائع في اغلب القوالب لفصل المنتج عن سطح القولبة والذي يُعرف بالقلب. هنالك نوعان من القذف الآلي، الأول يعرف بالسقوط الحر (Free Fall) ويسمى أحياناً بالعشوائي حيث فيه تسقط المنتجات بحرية داخل صندوق أو فوق سير ناقل، أما الثاني الذي يُعرف بالإزالة المتحكممة (Controlled Removal) وفيها تزال المنتجات من منطقة القولبة عن طريق روبوت (إنسان آلي) أو بواسطة آلية طرد.

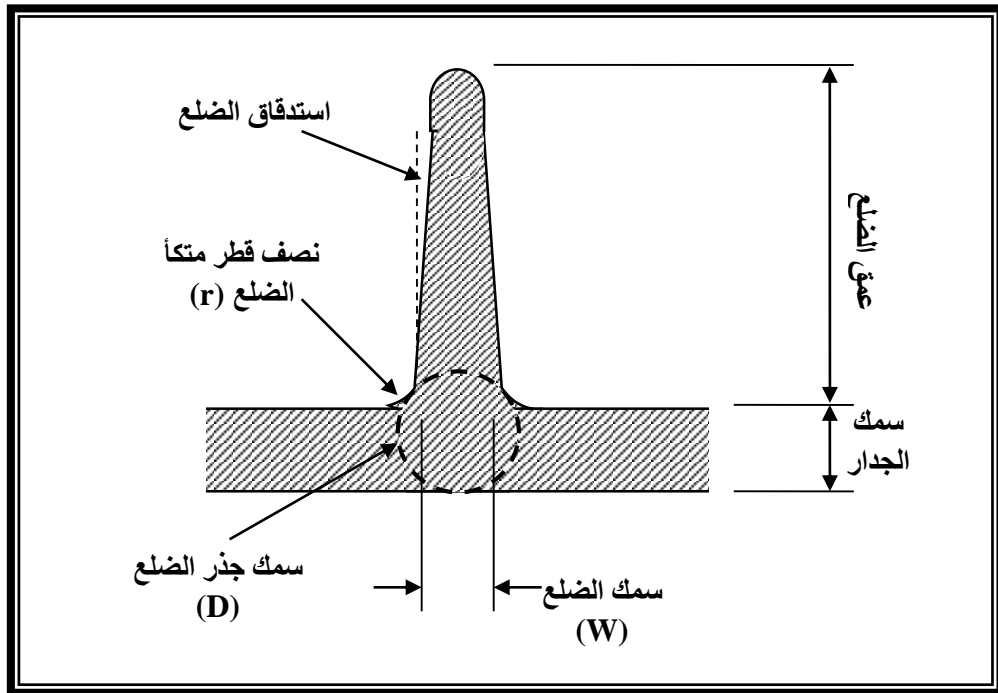
3-3 تصميم الأجزاء اللدائنية المقولبة

(Design of Molded Plastic Parts)

يجب أن تصمم أجزاء القوالب لكي تخدم الغرض المنشود منها وبأقل تكلفة ممكنة. تصنع العديد من المنتجات من اللدائن نظراً لجمال شكلها، لذلك يجب أن يؤخذ الفن بنظر الاعتبار عند تصميمها، ويجب أن لا نغفل قابلية الخدمة واقتصادية الصنع.

ان العديد من القوانين والاحتياطات التي تطبق على سباكة و قولبة المعادن، يمكن ان تُطبق كذلك في قولبة اللدائن. فالإستدقاق (Taper) (تناقص المساحة تدريجياً) هو شيء أساسي لإخراج الجزء المنتج من القالب و (3°) تعتبر قيمة قياسية لللدائن. يجب تجنب وجود المقاطع السميكة لأنها ستأخذ مواد أكثر ولأن تبريدها بطيء وستعيق القولبة. عوضاً عن ذلك يجب تزييد المقاطع التي تتطلب الصلابة بالأضلاع (Ribs)، أطراف محدبة (Beads)، والشفاه (Flanges). يجب ان تكون الأضلاع المستخدمة للتقوية، شكل (3-4) بمواصفات بعدية محددة وتتضمن:

- ❖ يجب ان يكون سمك الأضلاع (50-75%) من سمك جدار المنتج.
- ❖ يجب ان يكون نصف قطر المتكأ (40-60%) من سمك الضلع.
- ❖ عمق الضلع يجب ان لا يتجاوز (5) أضعاف سمك المضلع.
- ❖ عمل الاستدقاق في الضلع لتسهيل فصل المنتج من القالب.
- ❖ يجب ان لا يتجاوز سمك جذر الضلع (25%) أكثر من سمك الجدار.



شكل (3-4) الأضلاع المستخدمة في التقوية.

هنالك بدائل أخرى لزيادة الصلابة ومعامل المرونة وهي باستخدام (التقوية بالألياف) أو زيادة سمك الجدران، إذا كان ذلك ممكناً. إذا كان لدينا فضاء كافٍ يسمح بإضافة أو زيادة عدد الأضلاع فان ذلك سيحسن من صلابة البنية دون الحاجة إلى زيادة السمك. أن الانتقال بين المقاطع السميكة والنحيفة يجب ان يكون بشكل تدريجي حتى يسمح بالتبريد المنتظم وتجنب

الإجهادات الحرارية (Thermal Stresses). يجب أن نرود حافات المنتج بمتكأ زاوي (Fillet) أو أقواس (Radii) كافية لإزالة الحواف والزوايا الحادة أينما وجدت. هذا سيجعل المنتج أقوى وأكثر متانة وهذا سيقبل من كلفة القالب و سيساعد على إنسياب المادة اللدائنية بشكل جيد إلى القالب. و يجب أن يكون نصف قطر التقوس أو المتكأ الزاوي على الأقل (25%) من سمك الجدار ولا يصل أبداً إلى قيمة (0.8 mm). وكذلك يجب وضع خطوط أجزاء القالب لتضمن الكلفة المنخفضة لقالب وسهولة إزالة الزوائد و سهولة قذف المنتج.

تختلف المواد اللدائنية عن المعدنية عند قولبتها، فالمقاطع السميكة والنحيفة في السطح الواحد يجب تجنبها لان السميكة ستتقلص بمقدار اكبر مما يسبب تكون مغطس حراري (Heat Sinks) أو النقر (Dimples). إذا كنا لا نستطيع تجنب ذلك باستخدام الأضلاع والمساند، فربما بوضع نموذج اختبار (Pattern) على السطح الذي يُراد تشخيص العيوب فيه. ان الجدران اللدائنية يجب أن لا تكون نحيفة جداً أو ضعيفة: بصورة عامة ليس أقل من المدى (1.5–2.5 mm). يجب أن تكون الثقوب في القلب بقدر المستطاع لتجنب التشغيل، فالثقوب النافذة أفضل من غير النافذة لأن مسامرها القلبي يمكن إسناده من كلا طرفيه.

ان عمليات الإنهاء السطحي (التشطيب) واللون المختار للأجزاء اللدائنية المنتجة ستؤثر على جميع التكاليف. فعملية الإنهاء السطحي تتحكم بدرجة التشطيب ولذلك تتحكم بكلفة القالب، الجدول (3-1). ان تركيب المواد والألوان يمكن الحصول عليه من التقنيات المختلفة لتصميم القالب و طريقة التشغيل للآلة. ان غالبية المنتجات اللدائنية ستوجد فيها الزوائد والبوابات التي تتضمن قنوات التغذية، والمصببات التي يجب إزالتها، عادةً بعملية ثانوية، شكل (3-5). لذلك فعلياً ان نهتم كثيراً في الأجزاء المصممة حتى يكون إنجاز الإنهاء أكثر يُسراً بدون التأثير على المظهر الخارجي. ان الحل الشائع يكون بوضع حزوز حول القطع المنتجة عند خطوط الانفصال (بين المنتج وقنوات التغذية). ويمكن تشذيب الزوائد (Flash) عند الأطراف المحززة، والتي تخدم كدليل، بدون إفساد مساحة كبيرة صفيحة للقطعة المنتجة. وعندما يتطلب الأمر منا إضافة مؤثرات أخرى كالأغلفة، التلميع (Buffing)، الطلاء، وعمليات الطلاء ببخار المعدن فربما ستكون مثل هذه الأعمال ضرورية.

جدول (1-3) مؤشر السعر لمختلف الانهاءات السطحية.



مؤشر السعر	الوصف	درجة الخشونة	الخشونة (μm)
1000	ذو لمعان عالي، لا يمكن مشاهدة الخدوش وخطوط الانسياب.	N0-N2	$0.05 \geq$
500	لماع، وجود الخدوش الصغيرة مقبولاً	N3	0.1
200	إنهاء (تقني)	N4	0.2
100	الجمال ليس متطلباً	N5	0.8

تعتمد السماحات العملية (Practical Tolerances) لأجزاء قوالب اللدائن اعتماداً كبيراً على حجم المنتج. فالأبعاد التي تكون في حدود (25 mm) أو أقل في الأجزاء الصغيرة ممكن أن تحصل ما بين ($\pm 50 \mu m$). للأبعاد الأكبر من ذلك، والتي لا تتجاوز (200 mm)، فإن التسامح الواقعي ربما ($\pm 10 - \pm 20 \mu m/cm$)، على طول خطوط الأجزاء. على أي حال، يجب أن لا نحدد تسامح أكثر مما نحتاجه.



شكل (3-5) أنواع البوابات المستخدمة في قولبة اللدائن.

هنالك بعض الاختلافات بين بنية القوالب بسبب الخصائص المتغيرة للمواد المستعملة. فعند تصميم القالب وإيجاد سمك الجدار، يجب أن يُقَيِّم مهندسي التصميم والتصنيع قابلية اللدائن للانسياب خلال القنوات الضيقة للقالب. وتعتمد هذه الانسيابية على درجة الحرارة والضغط إلى مدى معين، لكنها تتغير باختلاف المواد. الجدول (3-2) يبين سمك بعض الأنواع المختلفة لمواد الترموبلاستيك.

جدول (2-3) سماكات الجدران الشائعة لمواد مختلفة من الترموبلاستيك.

مدى العمل		
الأقصى (mm)	الأدنى (mm)	مجموعة الترموبلاستيك
3.556	1.143	اكريلونايتيرال بيوتيددين ستيرين (ABS)
3.048	0.762	أسيثال
3.81	0.635	أكريليك
3.048	0.2032	بوليمر بلوري-سائل
2.921	0.254	نايلون
3.81	1.016	بولي كزيونيت
3.175	0.635	بولي يستر
5.08	0.762	بولي أثيلين
3.81	0.635	بولي بروبيلين
3.81	0.889	بولي ستيرين
9.05	2.032	بولي يريثين
3.81	1.016	بولي فينيل كلورايد (PVC)
3.81	0.889	ستيرين - أكريلونايتيرات (SAN)

3-4 متطلبات تصنيع القالب

هنالك أمور عدة يجب أن نأخذها بنظر الاعتبار عند تصنيعنا للقالب اللدائني وتشمل:

3-4-1 الدقة (Precision)

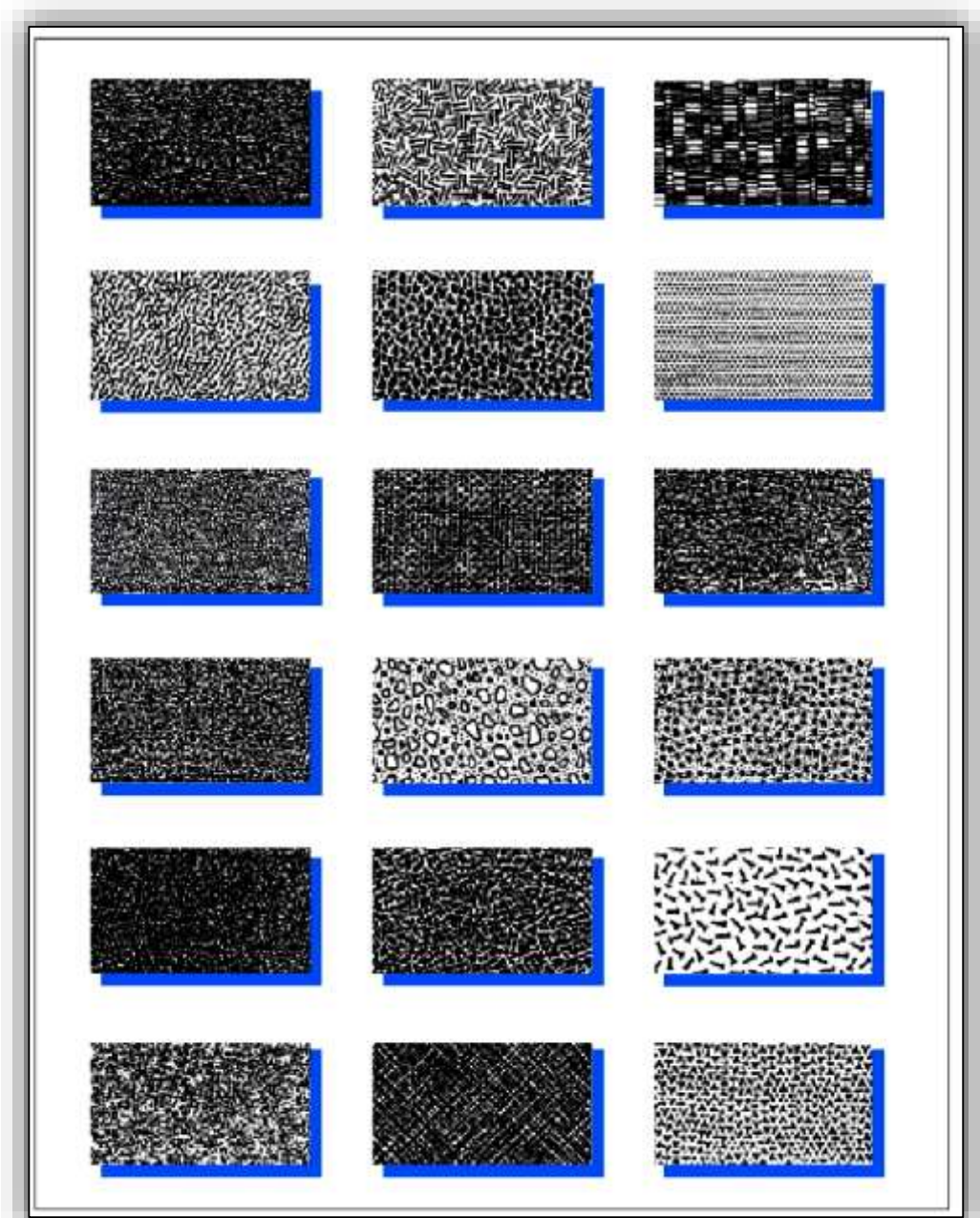
تعتبر الدقة أساس عمل أي قالب لدائني للحصول على منتج بالأبعاد المطلوبة، فالتسامحات التي يجب وضعها على الرسم يجب أن تكون معقولة وقابلة للتنفيذ، وفي حالة عدم القدرة على الحصول على التسامح المطلوب فيجب حينئذ أن يُنَبِّه المصمم بذلك.

ان المشكلة الرئيسية التي تؤثر على دقة القالب هو الانكماش الذي يحصل في المواد اللدائنية، فاللدائن ذوات معاملات الانكماش الأقل من (6%) عادةً لا توجد فيهم مشاكل عند حساب أبعاد القالب ونستطيع بسهولة الوصول إلى الدقة المنشودة، أما اللدائن ذوات معامل الانكماش الأكبر من (6%) فيجب أن نتأكد من أن أبعاد المنتج تكون عملية للقولبة.

3-4-2 الإنهاء السطحي (التشطيب) (Surface Finish)

يجب توضيح مقدار التهيئة السطحية المطلوبة على كل جزء من أجزاء القالب وذلك باستخدام الرموز الخاصة بدرجات التشطيب المطلوبة. فهناك اختلاف في درجات التشطيب من

سطح لآخر فالقلب (Core) يحتاج إلى درجة تشطيب جيدة وكافية أكثر من أي سطح آخر وذلك لتسهيل عملية فصل المنتج عنه عند القذف. يمكن أن تتم عملية تشطبيه بالسفع الرملي (Sand Blasting) أو الصقل بالبخار (Vapour Honing) أو بالتلميع (Buffing) أو بالتميش الكيميائي الضوئي (Photochemical Etching) أو بالحفر بالليزر (Laser Engraving).



شكل(6-3) أمثلة على تأثير التشطيب على البنية النسيجية لأسطح اللدائن.

ان الإنهاء السطحي سيؤثر على شكل البنية النسيجية لسطح المنتج اللدائني، شكل(6-3).

ان الغرض من عملية الإنهاء السطحي هو أحد هذه العوامل:

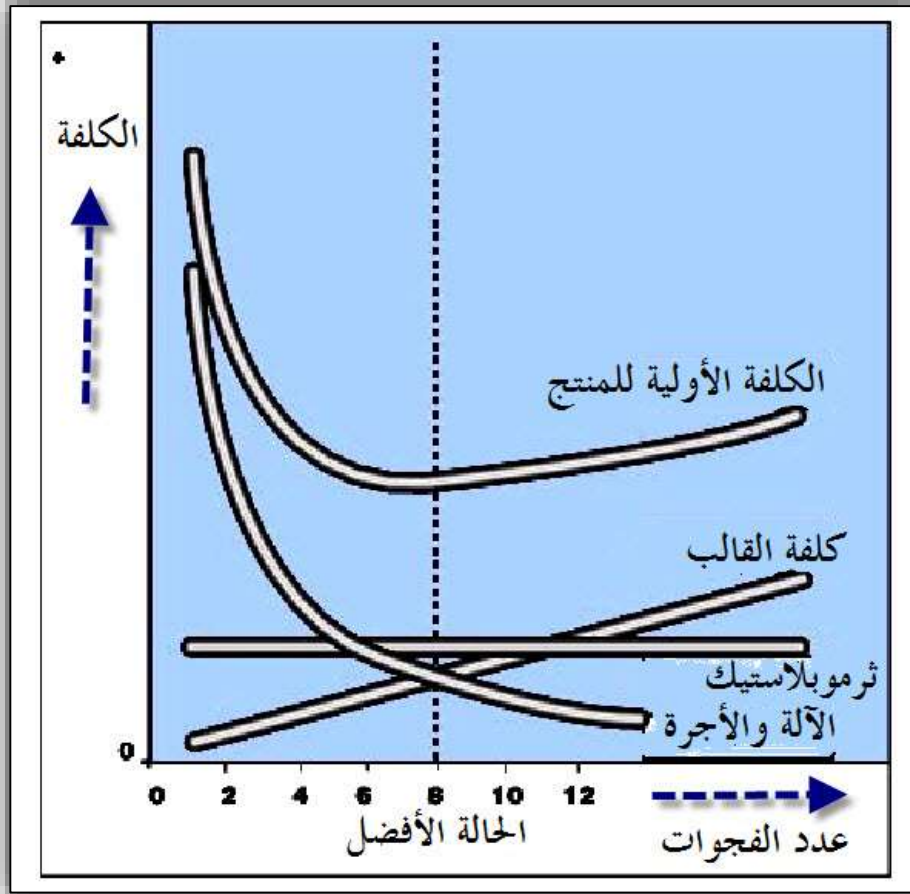
1. المظهر (بشكل حبيبات خشبية أو جلدية).
2. الوظيفية (مثلاً منع الانزلاق).
3. تغطية عيوب القولية.

3-4-3 الإنتاجية (Productivity)

تعتمد إنتاجية القالب على عدة عوامل وهي:

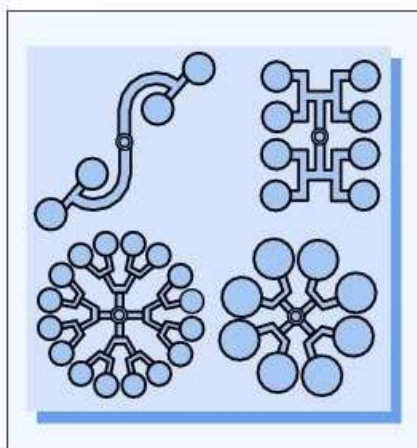
1. **عدد فجوات القالب:** من البديهي انه كلما زادت عدد فجوات القالب، زادت إنتاجيته وستزداد معها كلفة القالب. ان عدد فجوات القالب وهيكلا القالب سيعتمد كلاهما على العاملين الاقتصادي والتقني. فمن المهم معرفة عدد الأجزاء التي يمكن قولبتها والزمن المطلوب والثمن الذي له علاقة بكلفة تصنيع القالب. الشكل (3-7) يبين العلاقة بين الكلفة الكلية للمنتج وعدد الفجوات. ان نظام البوابة وموقع البوابة يمكن ان يحددان من حرية التصميم للقوالب المتعددة الفجوات. فمتطلبات الدقة في الأبعاد والجودة يجب ان تؤخذ كذلك بنظر الاعتبار.
- فطريقة وضع المجاري في القوالب المتعددة الفجوات يجب ان تصمم لكي تعمل بشكل آني ومتساوي في ملء فجوة القالب. فأنظمة المجاري الغير متوازنة ستؤدي إلى الملء الغير متساوي، مما سيؤدي إلى تجمد بعض هذه الفجوات الممتلئة والذي ربما سيؤدي إلى حدوث الفشل مثل:

- ❖ الملء الغير كامل
- ❖ اختلاف خواص المنتجات
- ❖ اختلاف الانكماش -الاعوجاج
- ❖ علامات المغطس
- ❖ زوائد
- ❖ صعوبة فصل المنتج من القالب
- ❖ عدم التناسق

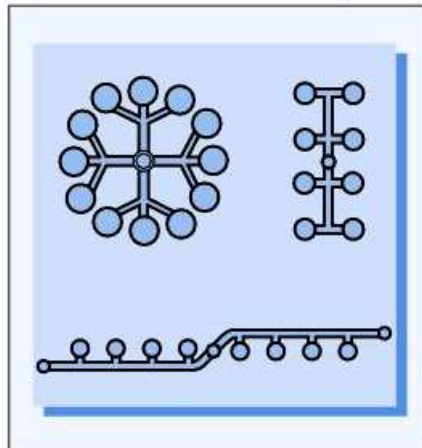


شكل (7-3) علاقة الكلفة الكلية للمنتج مع عدد الفجوات.

أحد الأمثلة على المجاري الغير متزنة مبينة في الشكل (3-8-أ). ويمكن باستخدام الحاسوب للنتبؤ بالتدفق ان نعدل أبعاد المجاري الابتدائية والثانوية للحصول أنماط ذات مليء متساوي.



أ



ب

شكل (8-3) (أ) أنظمة مجاري غير متوازنة؛ (ب) أنظمة مجاري متوازنة.

انه من المفضل ان تصمم المجاري بطبيعة متزنة كما مبينة في الشكل (3-8-ب).
ان العدد الأقصى للفجوات في القالب سيعتمد على الحجم الكلي للفجوات متضمناً كذلك
المجاري وعلاقتها مع أقصى سعة للآلة وأقصى قوة مسك لآلة القوالب. الشكل (3-9) يبين
قالب ذو فجوات متعددة.



شكل (3-9) قالب مصنوع من الصلب ذو منتجات متعددة.

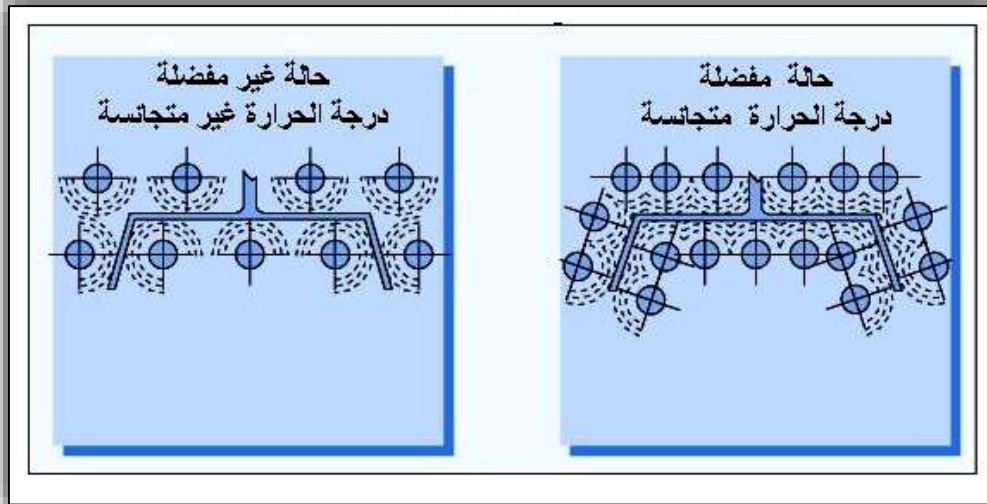
2. **جودة التبريد:** يعمل التبريد على تبديد حرارة القالب بسرعة وبتجانس. ان التبريد السريع والمتجانس هو أحد المتطلبات الضرورية لضمان الإنتاج الاقتصادي والجودة العالية للمنتج. ان التحكم الكافي بدرجة حرارة القالب هو عملية أساسية لاستمرارية العملية. ان توزيع دورات التبريد هو أحد الأمور المهمة لإنجاز هذا الهدف. يمكن الحصول على أفضل الخواص لللدائن الهندسية عن طريق اختيار درجة الحرارة المناسبة للقالب والحفاظ عليها خلال العملية الإنتاجية. ان لدرجة الحرارة تأثيراً كبيراً على:

- ❖ الخواص الميكانيكية
- ❖ سلوك الانكماش
- ❖ الاعوجاج
- ❖ جودة السطح
- ❖ زمن الدورة

تتطلب اللدائن من نوع الترموبلاستيك الشبه بلورية بصورة خاصة ان تُبرّد إلى معدل التبلور الأفضل. المنتجات التي تكون فيها أجزاء مختلفة في السمك بشكل كبير ، قد تكون عرضة للتشوه بسبب الاختلاف الموضعي في درجات التبلور.

"w"	"d"	"a"	"b"
سمك جدار المنتج mm (in)	قطر قنوات التبريد mm (in)	المسافة المركزية نسبة إلى فجوة القالب	المسافة المركزية بين قنوات التبريد
2 (0.08)	8 - 10 (0.31 - 0.40)		
2 - 4 (0.08 - 0.16)	10 - 12 (0.40 - 0.47)	1.5 - 2 d	2 - 3 d
4 - 6 (0.16 - 0.24)	12 - 14 (0.47 - 0.55)		

شكل(10-3) القواعد الأساسية في قنوات التبريد.



شكل (3-11) مواقع قنوات التبريد.

يتم صنع أنظمة التبريد بصورة عامة بالتقريب الخشن أو التفريز. ان السطح الداخلي الخشن سيعزز من التدفق المضطرب للسوائل التبريد، لذلك سيزوده بتبادل حراري أفضل. يجب وضع قنوات التبريد بالقرب من فجوة القالب وبمسافة مركزية متساوية (لاحظ الشكلين 3-10 و 3-11). يجب الأخذ بنظر الاعتبار الصلابة الميكانيكية للقالب المصنوع من الصلب الكربوني عند تصميم نظام التبريد.

3. **سرعة وزمن القذف:** إن الزمن الذي يستغرق لقذف المنتج هو زمن ضائع مثل زمن فتح وغلق نصفي القالب فخلال هذه الأزمنة لا يوجد إنتاج، وكلما قللنا من هذا الزمن ستكون سرعة القذف أعلى وبذلك نحصل على إنتاجية عالية.

4. **صلابة ومتانة القالب:** تعتمد الإنتاجية على جودة القالب (صلابته ومتانته) التي سيتم توضيحها لاحقاً.

5. **سهولة التركيب والتشغيل:** قد تبقى بعض القوالب مركبة على الآلة على مدار السنة، فزمن التركيب والتشغيل ليس ذي أهمية كبيرة على إنتاجيتهم، ومع ذلك تشغل العديد من القوالب على الآلة لزمن قصير نسبياً (أياماً، أسابيع، أو بعض الشهور) قبل أن تغير، وفي هذه الحالة يمكن أن نحسن إنتاجية القالب بجعل تغييره أسهل.

3-4-4 المقاومة الفيزيائية للقالب (Physical Resistant of Mold)

تعتمد مقاومة القالب على العديد من العوامل:

- اختيار المادة المناسبة
- تصميم الصلابة اللازمة لكل أجزاء القالب

- مقدار الحرص في تجنب مصادر الإجهادات
- مواصفات المعالجة الحرارية.

وفيما يلي أهم الخواص التي يجب أخذها بنظر الاعتبار:

1. صلابة الشد (Tension Strength)

يجب أن يكون القالب قوي بما فيه الكفاية لتحمل الضغوط الداخلية العالية التي تتولد أثناء عملية القولبة أو التشكيل في فجوة القالب. هنالك بعض المشاكل المتعلقة بالإجهادات المتولدة من جراء هذه القوى الداخلية فمثلاً إذا كان سمك جدران فجوة القالب رقيق جداً أو زوايا السحب صغيرة جداً، فإن التمدد يمكن ان يكون له تأثير خطير على عمل القالب. فجدران الفجوة ستتمدد كلما تصبح الفجوة ممتلئة باللدائن أو عندما يؤثر ضغط الحقن تماماً على اللدائن عند نهاية فترة مليء القالب و تعود الى حجمها الأصلي عندما ينخفض الضغط في جدران الفجوة .

2. الصلابة الإنضغاطية (Compression Strength)

يسبب الضغط الذي بواسطته يتم إدخال المادة اللدائنية الى فجوة القالب، الى تولد إجهادات انضغاطية على القلب، وهنا لا توجد مشكلة باستثناء قنوات التبريد أو فتحات البراغي الموجودة في القلب والتي تكون قريبة من السطح، فيمكن ان ينحني القلب عند هذه النقاط الضعيفة وينهار.

3. انحناء الصفيحة (Plate Bending)

هنالك مساحة يكون عندها القالب ضعيف جداً ألا وهي صفيحة القذف، فعندما تكون قوة القذف عالية فان ذلك قد يؤدي الى انحناء صفيحة القذف المستخدمة لتثبيت مسامير القذف. لهذا يجب على المصمم ان يأخذ أقصى قيمة لآلية القذف الهيدروليكية المتوفرة للآلة المستخدمة بحيث ان الإجهاد الأقصى لا يتجاوز (20%) من إجهاد الخضوع لمعدن الصفيحة المستخدمة.

4. التآكل بالحك (Fretting)

التآكل بالحك هو بليان السطح بسبب الحركة تحت تأثير ضغط خفيف ويحدث بين أي قطعتين تقصلاهما مسافة صغيرة جداً (0.1 - 0.5 mm) وتتحركان ذهاباً وإياباً فوق بعضهما البعض. التآكل بالحك لا يزال غير مفهوم بالكامل ولكنه يُحتمل أن يكون نوع من فشل الكلال لسطح المعدن. التزليق وغيرها من الطرائق الأخرى لا تساعد على اجتناب هذا النوع من البلى، ولهذا عند تصميم القالب فمن الأفضل ضمان أن الحركات الصغيرة لا تترك أثراً على القالب.

5. البلى الناتج من احتكاك اللدائن

ويشمل هذا النوع من البلى الذي يحدث عند بوابة القالب حيث تنساب اللدائن الحاكة (Abrasive) من خلالها بسرعات عالية فتعمل هذه اللدائن على توسيع حجم فتحة البوابة إلى حجم أكبر من الحجم المسموح به. ولحل هذه المشكلة غالباً ما تصمم هذه البوابات بجعلها قابلة وسهلة الاستبدال بأقل تكلفة ممكنة وخاصة عندما تصبح بالية لأنها ستؤدي إلى تُعطل الإنتاجية. و يمكن أن ينطبق هذا على جميع أجزاء القالب التي هي في حالة تماس مع اللدائن.

6. الصدأ (Oxidation)

ان الصدأ هو تأكسد المعدن (الصلب الكربوني في حالة القوالب)، وهو يؤثر على السطوح الخارجية والداخلية للقالب. ولمنع الصدأ الخارجي، يجب علينا حفظ القالب بشكل سليم بعد كل توقف أو بعد إزالته من الآلة فيجب تنظيفه بالمسح ورش الزيت الواقي من الصدأ، أما إزالة الصدأ بصقل السطح فهو أمر غير محبذ لأنه سيؤثر على أبعاد القالب. أما الصدأ الداخلي فيحدث في السطوح الداخلية لقنوات تبريد القالب والمشكلة هنا إن الصدأ داخل هذه القنوات يعمل على أعاقه انتقال الحرارة ويقلل من كفاءة منظومة التبريد ويمكن أن يُنشأ شقوقاً داخلية في القالب. ولحل هذه المشكلة فإن اليوم هنالك ميل لصنع القوالب من الصلب الذي لا يصدأ (Stainless Steel). إن استخدام سوائل تبريد خاصة يحد كذلك من هذه المشكلة.

3-4-5 السلامة الصناعية

إن حماية العمال فضلاً عن حماية أجزاء القالب نفسه تحتل الأولوية في جميع مراحل عمليات التصميم ويمكن توفير ذلك بإتباع ما يلي:

أ. تزويد القالب بمشبكات أو أغطية واقية، وتصنع هذه الأجزاء بحيث تكون سهلة الربط وخالية من الحواف الحادة أو البارزة لتفادي الحوادث. وتكون هذه أما أغطية واقية ثابتة أو تعشق يدوياً أو آلياً.

ب. توفير الأنوار والأجراس و العدادات لتتبيه العامل عند ازدياد الحمل عن الحدود المسموح بها لعمل الآلة.

ج. تزويد الآلة بصمامات الأمان لمنع احتمال زيادة درجة الحرارة أو الضغط عن الحدود المسموح بها ضمن مواصفات الآلة.

د. تركيب منظمات السرعة على الأجزاء الدوارة لمنع تجاوز سرعتها عن الحدود المطلوبة.

هـ. توفر الصمامات الكهربائية (Fuses) و مفاتيح قطع التيار الكهربائي والتي تتيح الفرصة لفصل الدوائر الكهربائية عن مصدر التيار عند زيادة الأحمال.

3-4-6 صيانة القالب (Mold Maintenance)

إن الصيانة المنتظمة والدائمة للقالب تؤدي إلى زيادة الإنتاجية وثبات جودة المنتجات وتقلل من زمن التوقف (للتصليح) والخسائر وتتضمن الصيانة:

1. **صيانة قنوات التبريد:** غالباً ما يترسب على السطوح الداخلية لقنوات التبريد الصدأ والرواسب التكلسية والطحالب وكما أشرنا سابقاً إن ذلك سيؤدي إلى تقليل المساحة المقطعية وبالتالي ستقلل من الحرارة المنتقلة بين سائل التبريد والقالب. لذا يجب أن تنظف هذه القنوات باستخدام مادة منظفة وغالباً ما تكون حامض الهيدروكلوريك والماء مع وجود مادة تمنع التفاعل الكيميائي. يجب إزالة الماء من قنوات القالب عند تخزينه باستخدام الهواء المضغوط ثم تجفف بالهواء الحار.
2. **صيانة أسطح القالب:** بعد أن تنتهي دورة الإنتاج، يجب أن تُزال المواد اللدائنية المتبقية في القالب وهذا يعتمد على نوع مادة القوالب وكميتها، والطريقة المتبعة هي استعمال الماء والصابون لإزالة المواد أو أي رواسب أخرى ثم يجفف القالب. أما إذا كانت هنالك بعض البقع للصدأ فيجب إزالتها قبل التخزين أيضاً وكذلك إزالة زيوت التزليق من الأجزاء المتحركة في القالب.
3. **إجراءات وقائية:** بعد إتمام عملية الصيانة، يجب تجفيف القالب كلياً ويُشحَم سطحياً بشحم مقاوم للتآكل (الفازلين) وهذا مهم بالأخص للأجزاء المتحركة مثل صحيفتي القذف وغيرها، ولضمان تخزين طويل للقالب فانه يجب أن يُغطى كلياً بورق زيتي لضمان بقاءه جافاً وبعيداً عن الرطوبة.

3-4-7 تقدير كلفة القالب (The Estimation of Mold Cost)

يجب أن تكون كلفة القالب تنافسية، و معقولة بحيث يتمكن الزبون من الشراء مع تحقيق الربح المطلوب للمصنع. من البديهي أن زيادة التعقيدات و الحجم سيزيدان من كلفته، فالقالب البسيط مع وجود تطوير بسيط في أنظمة التبريد أو القذف يمكن أن يكون مرضياً تماماً للإنتاج القليل، أما في الإنتاج الكبير فكل احتمال يحقق أفضل تبريد أو أسرع قذف أو أطول عمر للقالب يجب أن يؤخذ بنظر الاعتبار حتى لو زادت كلفة القالب.

تكلفة القالب تزداد غالباً مع زيادة عدد فجواته ، وتتألف كلفة القالب من العناصر التالية:

- كلفة المواد

- كلفة التصنيع
- كلفة التجميع
- كلفة رقابة الجودة
- كلفة التصميم

3-5 مادة القالب (Mold Material)

تستخدم في الغالب مواد ذات مقاومة عالية والتي من المتوقع أن يكون عمرها الخدمي طويل وموثوقاً بها للاستخدام المتكرر بالرغم من تعرضها لأحمال شديدة خلال عملية القولبة. وغالباً ما يستعمل الصلب لما يتمتع به من مقاومة عالية للبليلان و عمر خدمي طويل. هنالك عوامل عديدة تحدد اختيار مادة القالب ومنها الاعتبارات الاقتصادية، نوع عملية القولبة أو التشكيل وعمر القالب. ومن أهم المواد المستخدمة في صناعة القوالب هي:

3-5-1 الصلب الكربوني (Steel)

وهو المعدن المفضل للعمر الخدمي الطويل لما يتميز به من خواص وهي:

1. سهولة الصقل
2. مقاومة البلى والحرارة
3. مقاومة التآكل
4. موصل جيد للحرارة
5. صلابة وصلادة كافيتين.

هنالك أنواع عديدة من الصلب الكربوني تستخدم في صنع القوالب، لذا فعلى المصمم للقالب أو مصنع القالب أن يختار النوع الملائم للعمل. وتشمل أنواع الصلب:

أ) الصلب الكربوني المُصلد السطح (Case Hardening Steel)

يعتبر هذا النوع هو الأفضل لصناعة القوالب حيث يمثل (80%) من الاستهلاك الكلي للصلب في صناعة القوالب نظراً لمقاومته العالية للبلى من خلال تصليد سطحه بالكربنة (Carburization).

ب) الصلب الكربوني المُنترد (Nitride Steel)

جميع أنواع الصلب التي تحتوي على عناصر تكون النتريد كالكروم، المولبدنيوم، الفناديوم أو الألمنيوم والتي تقوم بامتصاص النيتروجين من الوسط المحيط الذي ينتشر داخل السطح الخارجي. تتم هذه العملية عند درجة حرارة (350 - 380 °C) حيث تزود هذه العملية الصلب بالصلادة سطحية عالية و سطح مقاوم للبلى. خلال عملية النتردة لا يحدث تشوه في القالب عادةً.

(ج) الصلب الكربوني البيني المُصلّد (Through – Hardening Steel)

تزداد صلادة هذا النوع من الصلب بالحصول على طور المارتنزيت (Martensite) (وهو محلول جامد من الكربون في الصلب المُصلّد) الذي ينتج بالتبريد السريع للصلب. وتعتمد الخواص الميكانيكية المطلوبة على وسط ومعدل التبريد. أما الموصلية الحرارية فتعتمد على النسبة بين المساحة والحجم وكذلك على عنصر السبك المضاف للصلب كالمنجنيز، الكروم، السليكون والنيكل. يتمتع هذا النوع من الصلب بمقاومة انضغاطية عالية لذا فهو مناسب للقوالب ذات الفجوات السطحية.

(د) الصلب الكربوني المُعالج حرارياً (Heat-Treated Steel)

حيث يخضع هذا النوع من الصلب لمعالجة حرارية تسمى المراجعة (Tempering) يجريها المصنع، وتتم عند درجة حرارة (500 °C). حيث يتحول المارتنسيت الى كريد وحديد ألفا، وهذا سيؤدي إلى نقص القساوة (Brittleness) والصلادة والمقاومة وزيادة المتانة الديناميكية (Toughness)، يفضل استخدام هذا النوع في القوالب المتوسطة والكبيرة الحجم.

(هـ) الصلب الكربوني المقاوم للتآكل الكيميائي**(Corrosion-Resistance Steel)**

هنالك مواد لدائنية تحرر بعض المواد الكيماوية خلال عملية القولبة، تهاجم سطح الصلب فتكون الصدأ، وأفضل طريقة لمعالجة هذه الحالة هو باختيار الصلب المقاوم للتآكل الكيميائي. ولإكساب الصلب مقاومة للتآكل، يتم سبكه مع الكروم بنسبة أقل من (12%) حيث طبقة واقية من أكسيد الكروم عند الاتصال مع أوكسجين الهواء، تحميه من التآكل.

(و) الصلب الكربوني المُنقى (Refined Steel)

يعتمد الشكل الجمالي للمنتج على حالة سطح القالب، وأفضل أنواع الصلب هو الذي يمكن صقله، وكيف يمكن صقله أن يتأثر بدرجة النقاء. تعتمد هذه الدرجة على الشوائب الغير المعدنية الموجودة في الصلب كالأكاسيد والكبريتات والسيليكات. يمكن إزالة هذه الشوائب بواسطة إعادة صهره، حيث تستعمل الاليكترودات ذاتية الاستهلاك كإحدى التطبيقات الحديثة لهذا الغرض.

تعطي عملية التنقية المميزات التالية:

- ❖ بنية متجانسة أكثر
- ❖ تقلل من حجم وكمية الشوائب الغير المعدنية

3-5-2 المواد المسبوكة (Cast Materials)

إن إنتاج القوالب من الصلب المطروق أو المدرفل يعتبر باهظ الثمن نسبياً، وذلك بسبب الكلفة العالية للميكنة وكلف المعدات الضرورية وبالإضافة الى فقدان العالي للمواد أثناء عمليات التشغيل والذي قد يبلغ حوالي (30 - 50 %) في حالة الفجوات الكبيرة. تصنف المواد المسبوكة والتي تستخدم في صناعة القوالب إلى ثلاث أصناف وهي:

أ. المواد الحديدية

ب. المواد الغير الحديدية

ج. المواد الغير المعدنية

3-5-3 مواد معدنية غير حديدية (Nonferrous Metallic Materials)

إن أفضل المواد المعدنية الغير الحديدية المستخدمة في صناعة القوالب هي:

(Copper Alloys) سبائك النحاس (أ)

تعتمد أهمية سبائك النحاس في صناعة القوالب على كونها مادة ذي موصلية حرارية ومطولية عالية. إن الخواص الميكانيكية للنحاس النقي تعتبر متوسطة حتى لو تم تحسينها بالدرفلة على البارد أو بالتشكيل، لذلك يستعمل النحاس كمادة مساعدة في صنع القوالب في أحسن الأحوال، ومن أهم سبائكه هي:

(Beryllium-Copper Alloys) سبائك البريليوم-النحاس (ب)

تعتمد الخواص الميكانيكية والحرارية على التركيب الكيميائي للسبيكة وبزيادة نسبة البريليوم في السبيكة فإن الخواص الميكانيكية ستتحسن بينما تسوء الخواص الحرارية. إن السبائك التي تكون فيها نسبة البريليوم أكبر من (17%) هي السائدة في صناعة القوالب حيث تمتلك قوة شد أكبر من (1200 MPa) ويمكن تصليدها إلى أعلى من (440 برينيل) وتتميز بالمطيلية الجيدة ويمكن صقلها بسهولة. أما السبائك ذات نسبة البريليوم الأقل من (17%) فلا تستخدم لرداءة خواصها.

(Zinc Alloys) سبائك الزنك (ج)

تستخدم سبائك الزنك في صناعة القوالب الأولية أو قوالب الإنتاج الصغير نظراً لرداءة خواصها الميكانيكية وفي الغالب يستفاد منها في صناعة قوالب القلوبة بالنفخ أو التشكيل بالترغيع حيث إن القوالب هنا لا تكون تحت تأثير حمل ميكانيكي. تتميز سبائك الزنك بالموصلية الحرارية الجيدة والتي تبلغ (105 W/m.K).

(Aluminum Alloys) سبائك الألمنيوم (د)

لم يتم استخدام سبائك الألمنيوم في صناعة القوالب إلا مؤخراً، حيث لم تكن تبدي المادة القدرة على تحمّل الإجهادات الميكانيكية المتوقعة. استخدمت هذه المادة حديثاً بعد أن ضمنت آلات القولبة بالحقن الجديدة توزيعاً منتظماً للأحمال. تتميز قوالب الألمنيوم بكونها أخف وزناً من قوالب الصلب وقابليتها للتشغيل أفضل، إضافة إلى تمتعها بكثافة نوعية منخفضة وموصلية حرارية عالية مما يؤدي إلى تبديد وتوزيع سريع ومنتظم للحرارة.

هـ) سبائك القصدير - البزموت (Bismuth-Tin Alloys)

تُسوّق سبائك القصدير-البزموت تحت أسم تجاري هو سبيكة سيرو (Cerro Alloy) وهي غالباً عبارة عن معادن ثقيلة وملساء وتتركب من معادن ذات درجة انصهار منخفضة تتراوح ما بين (40 - 170 °C) وغالباً ما تكون مناسبة للسباكة العادية أو السباكة بالتفريغ. لا يحدث تغير في حجم هذه السبائك أثناء التجمد لذا تكون مناسبة لصنع القوالب. وبسبب خواصها الميكانيكية المتوسطة فإنها تستخدم في المقام الأول لقوالب الحقن ولكن الاستخدام الشائع لها هو في صناعة قوالب النفخ وقوالب التشكيل الساخن.

3-6 قوالب القولبة بالحقن

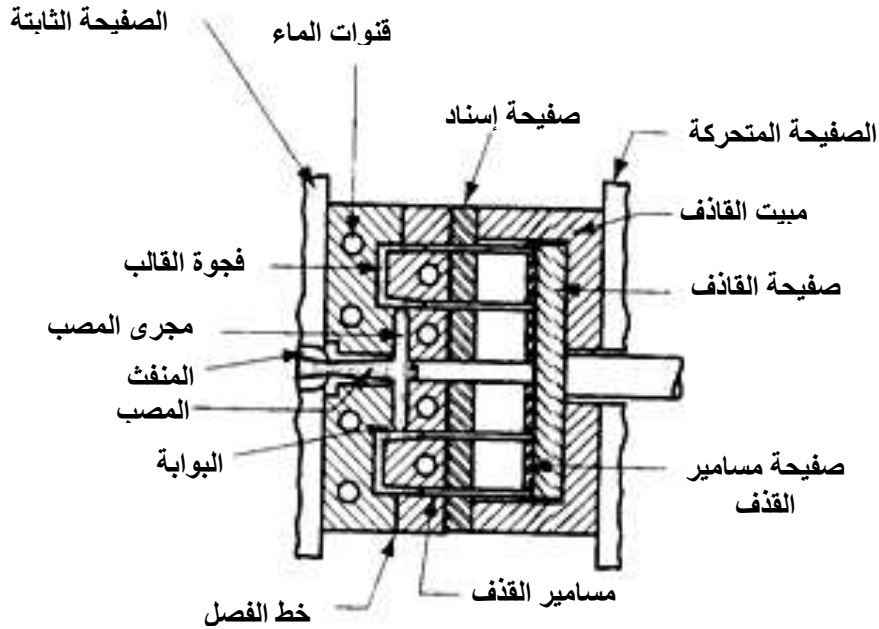
القالب هو مُعدة خاصة تستخدم في القولبة بالحقن، ويصمم بحسب رغبة الزبون ويصنع بحسب شكل المنتج المرغوب إنتاجه. وعندما يتم الانتهاء من كمية الإنتاج المطلوبة، يمكن استبدال القالب بنوع آخر جديد لإنتاج منتجات أخرى مختلفة. وهناك أنواع عديدة من القوالب التي تستخدم في القولبة بالحقن منها:

القالب ذو الصفيحتان؛ حيث ان القالب التقليدي لهذا النوع من القوالب يتألف من نصفين مثبتين على صفيحتي وحدة التثبيت المُحكم (Clamping) لماكينه القولبة. فعندما تفتح وحدة التثبيت المُحكم، فان نصفي القالب ينفتحا، كما مبين في الشكل (3-12-ب). ان الصفة الأكثر تمييزاً للقالب هي الفجوة، التي يتم الحصول عليها بإزالة المعدن من السطوح المتراكبة (Mating Surfaces) لنصفي القالب. يمكن أن يحتوي هذا القالب على فجوة واحدة أو فجوات متعددة لإنتاج أكثر من جزء في الضربة الواحدة. الشكل (3-12) يبين قالباً متألفاً من فجوتين، حيث ان سطح الفصل (أو خط الفصل في المقطع العرضي لمسقط القالب) هو المكان الذي عنده يفتح القالب لإزالة الجزء المنتج.

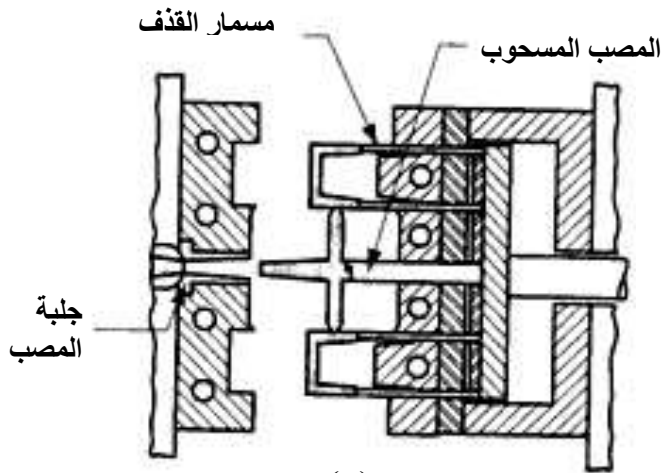
بالإضافة الى الفجوة، هنالك مميزات للقالب والتي تستخدم كعامل أساسي خلال دورة القولبة. فيجب على القالب ان يحتوي على قنوات التوزيع والتي من خلالها يتم انسياب البوليمر المنصهر من منفث أسطوانة الحقن الى فجوة القالب، و تتألف قنوات التوزيع من:

1. المصب (sprue)، والذي يصل المنفث بالقالب.

2. مجاري الصب (Runners)، والتي تصل بين المصب وفجوة أو فجوات القالب.
3. البوابات (Gates)، والتي عندها يضيق إنسياب البوليمر المصهور قبل وصوله الى فجوة القالب. وهناك بوابة واحدة أو أكثر تقود لكل فجوة في القالب.



(أ)



(ب)

شكل (3-12) قالب الحقن ذو الصفيحتان؛ (أ) وضع المنغلق، (ب) الوضع المنفتح.

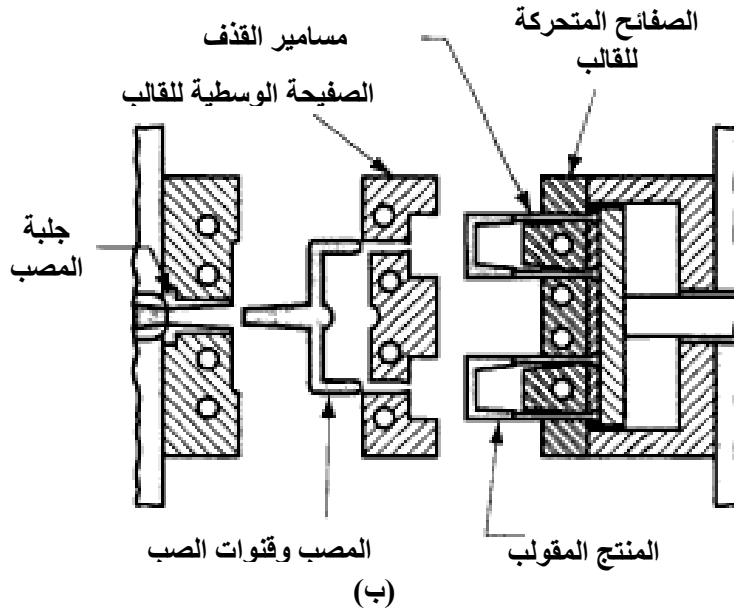
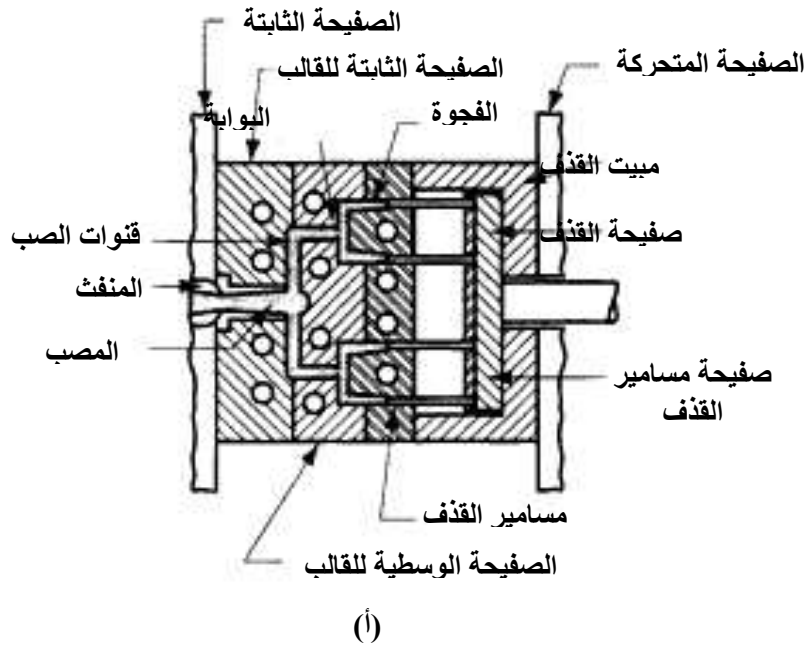
سنحتاج الى نظام لقذف المنتج المقولب من فجوة القالب عند انتهاء دورة القولبة. وتقوم مسامير القذف المثبتة في النصف المتحرك من القالب عادة بإنجاز مثل هذه المهمة. حيث تُقسّم الفجوة

الموجودة في القالب بين نصفي القالب بطريقة بحيث أن حدوث الانكماش الطبيعي في المنتج المقولب يؤدي به الى الالتصاق في النصف المتحرك من القالب. وعندما يفتح القالب، فان مسامير القذف تدفع الجزء المقولب الى خارج فجوة القالب.

نحتاج الى منظومة تبريد للقالب، وهذه تتألف من مضخة خارجية تتصل بأنابيب قنوات المياه الموجودة داخل القالب، والتي من خلالها يتم تدوير الماء لإزالة الحرارة من البوليمر الساخن. ويجب ان يتم تفرغ الهواء من فجوة القالب حالما يدخل البوليمر الى داخل الفجوة. ان أغلب الهواء المحصور يمر من خلال الخلوص الصغير الموجود بين مسامير القذف في القالب. بالإضافة الى ذلك، فانه غالباً ما يتم عمل ممرات للتفيس بتشغيل السطح الفاصل بين نصفي القالب، فقط عمق بحوالي (0.03 mm) وطول (12-25 mm). هذه القنوات تسمح للهواء بالهروب الى الخارج ولكنها صغيرة جداً فلا تسمح لمنصهر البوليمر اللزج بالمرور من خلالها.

3-7 أنواع القوالب الأخرى

تعتبر القوالب ذات الصفيحتان هي الأكثر شيوعاً في القوالب بالحقن، وكبديل لها هنالك القالب ذو الثلاث صفائح، شكل (3-13). هنالك فوائد ومميزات للقالب المصمم بهذه الطريقة. أولها، ان انسياب البوليمر المنصهر يتم من خلال بوابة توضع عند قاعدة المنتج الذي يكون على شكل قذح مثلاً، أفضل مما ان توضع جانباً. فهذه الطريقة تسمح بتوزيع المنصهر بشكل متساوي الى نصفي القذح. في التصاميم التي تكون فيها البوابات جانبية كما في القوالب ذو الصفيحتان، يجب ان ينساب البوليمر حول القلب ويلتحم عند الاتجاه المعاكس، وربما يتكون عند خط التلاحم منطقة ضعيفة. ثانياً، سيسمح لنا هذا القالب ذو الثلاث صفائح بأتمة العملية في الآلة بدرجة تفوق النوع الأول. فعندما يُفتح القالب، فانه ينفصل الى ثلاث صفائح وبينهما فتحتان. هذه القوة تعمل على فصل قنوات المصبب والمنتجات، والتي تسقط بفعل الجاذبية (مع احتمال استخدام منفاخ هوائي أو ذراع روبوت لانجاز ذلك) إلى حاويات مختلفة توضع تحت القالب.



شكل (3-13) قالب الحقن ذو الثلاث صفائح؛ (أ) الوضع المنغلق، (ب) الوضع المنفتح.

تعتبر المصببات وقنوات الصب في منتجات كلا النوعين من القوالب السابقة الذكر هي فضلات المواد، وفي حالات كثيرة ممكن ان تطحن ويعاد استعمالها. بالرغم من ذلك إلا انه في بعض الحالات يُفضل قولبة المنتج بمواد لم يتم قولبتها سابقاً. قنوات الصب الساخنة تمنع تجمد المصب وقنوات الصب ويتم ذلك بوضع المسخنات حول قنوات الصب المقابلة لها . فبينما يتجمد البوليمر في داخل فجوة القالب ، فان المواد التي في المصب وقنوات الصب تبقى منصهرة، جاهزة لكي يتم حقنها الى الفجوة في الدورة القادمة.

أسئلة الفصل

1. ما هي الوظائف الأساسية للقالب اللدائني؟ وضحها باختصار.
2. ما هي المتطلبات الأساسية عند تصنيع القالب لإنتاج المنتجات اللدائنية؟
3. على ماذا تعتمد صلابة القالب؟
4. ما هي العوامل التي تعتمد عليها إنتاجية القالب اللدائني؟ وضحها بإيجاز.
5. كيف نستطيع حماية أسطح القالب من الصدأ؟
6. ما هي إجراءات السلامة الصناعية التي يجب إتباعها في جميع مراحل عمليات التصميم؟
7. ما الغرض من إجراء عمليات الصيانة للقالب اللدائني؟ و ماذا تتضمن؟
8. لماذا يعتبر الصلب هو المعدن المفضّل في صناعة قوالب اللدائن؟ وما هي أنواع الصلب المستخدمة في ذلك وما هي مميزاتها؟
9. ما هي المعادن الغير حديدية التي تستخدم في صناعة قوالب اللدائن؟ وما مميزات كل منها؟

الفصل الرابع

أنظمة المبلمرات

POLYMER SYSTEMS

1-4 مقدمة

لقد لاحظنا من خلال مناقشتنا لميكانيكيات التقوية، إن هنالك بعض اللدائن يمكن أن تتغير خواصها بشكل كبير باستخدام تقنيات كالبوليمرات المشتركة (Copolymerization)، الحشوات (Fillers)، اللدائنات (Plasticizer)، البوليمرات الموجهة (Oriented)... الخ. ان البوليمرات التي لا يُضاف إليها أية إضافات تسمى بالهوموبوليمر (Homopolymer). وفي هذا الفصل سنستعرض بعض أنظمة المبلمرات بنوعيتها وهما اللدائن الحرارية واللدائن المتصلبة حرارياً، وسوف نُركز على الهوموبوليمرات. سوف نستعرض كيف تختلف بنيتها الكيميائية ومن ثم سنناقش بعض خصائصهم المميزة وأهم تطبيقاتها.

2-4 اللدائن الحرارية (الثرموبلاستيك) (TP)

1-2-4 البوليمرات الأثينية (Ethenic Polymers)

ان المصطلح إيثانيك (Ethenic) يأتي من حقيقة كون هذه العائلة من البوليمرات تمتلك بنية أساسية للمونومير مشابه لبنية الأثيلين، $(H_2C=CH_2)$. وكما اشرنا سابقاً بان هنالك مجموعة من البوليمرات يمكن الحصول عليها عند تغيير هيكل المونومير، بإزالة ذرة هيدروجين واستبدالها بذرة أخرى أو بمجموعة ذرات. هذه هي الطريقة التي تتكون بها العائلة التي يُطلق عليها البوليمرات الأثينية. الجدول (1-4) يبين مجموعة من البوليمرات التي أساس هيكلها الأثيلين.

البوليمر	البديل لذرة الهيدروجين
Polyvinyl chloride (بولي فينيل كلورايد)	Cl
Polyvinylidene chloride (بولي فينيلدين كلورايد)	Cl + Cl
Polypropylene (بولي بروبيلين)	[CH ₃] ^a
Polyisobutylene (بولي أيزوبوتيلين)	[CH ₃] + [CH ₃]
Polytetrafluoroethylene (بولي تترافلوروايثيلين) (الفلون)	F + F + F + F
Polytrifluorochloroethylene (بولي تترافلوروكلوروايثيلين)	F + F + F + Cl
Polyvinyl acetate (بولي فينيل أسيتات)	$\left[\text{O} - \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} - \text{O} - \text{C} - \text{CH}_3 \right]$
Polyvinyl alcohol (بولي فينيل الكحول)	$\left[\text{OH} \right]$
Polystyrene (بولي ستايرين)	$\left[\begin{array}{c} \text{H} - \text{C} = \text{C} = \text{C} - \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H} - \text{C} \quad \quad \text{C} - \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H} \end{array} \right]$
Polymethyl methacrylate (بوليمثيل ميثاكريلات)	[CH ₃] + [COOH ₃]
Polyacrylonitrile (بولي أكريلونائترال)	[CN]

a: كل قوس لمجموعة يستبدل ذرة هيدروجين واحدة.

1) البولي إثيلين (Polyethylene)

يمكن أن يُصنع البولي إثيلين بأوزان جزيئية مختلفة. ان الأصناف الشائعة له هي المنخفض الكثافة (Low Density) والعالي الكثافة (High Density) والفائق الوزن الجزيئي (Ultrahigh Molecular Weight). وجميعها تمتلك نفس البنية للمونومير؛ والاختلاف فقط يكون في أطوال سلاسلها. ان لهذا الاختلاف تأثيراً كبيراً على الخواص الميكانيكية، فالنوع المنخفض الكثافة يستخدم في صناعة الأفلام، منتجات طلاء الورق، أكياس القمامة، ومنتجات عديدة أخرى التي غالباً ما تُرمى بعد استعمالها. أما النوع العالي الكثافة، فإنه يستخدم في صناعة أجزاء عديدة من اللدائن المقولبة بالآلات الحقن. ان منتجاته متوفرة بشكل صفائح وأنابيب للاستخدام في أنظمة الأنابيب.

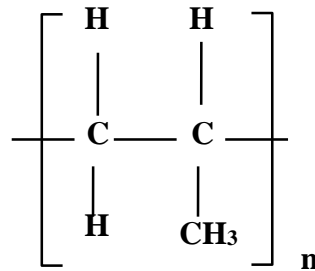
ان جميع أصناف البولي إثيلين تمتلك مقاومة كيميائية ممتازة، فتجعلها مناسبة للاستخدام في صناعة حاويات المواد الكيميائية كالخزانات و الأواني، فهناك العديد من الحوامض القوية التي تُباع وهي معبأة في حاويات مصنوعة من البولي إثيلين.

ان النوع الفائق الوزن الجزيئي يمكن أن يكون جداً مفيداً في صناعة الأجزاء التي تقاوم البلى في تصميم الآلات. انه يميل إلى مقاومة البلى بواسطة الملاط (Slurries) والدقائق الصلبة، حيث تنزلق المعادن بحرية على السكك المصنوعة من هذه المادة. و يتوفر بشكل أشرطة (Strips) بسمك وعرض مختلفين مع وجود جانب واحد لاصق فيه. يمكن استخدام هذه الأشرطة لصناعة خوابير التثبيت (Gibs) أو كجزء من خط تغذية المظلة الجوية (الباراشوت) (Chutes). ان هذا النوع صعب القولية، لذلك تتركز تطبيقاته على الأجزاء المصنعة بشكل أشرطة.

هنالك العديد من البوليمرات التي تتفوق بخواصها الميكانيكية على البولي أثيلين، لذلك، يستخدم بصورة عامة في تطبيقات الآلات لمقاومته العالية للمواد الكيميائية والبلبان أكثر من التطبيقات الهيكلية.

(2) البولي بروبلين (Polypropylene)

يصنع هذا البوليمر من غاز البروبلين، الذي ينتج باستبدال مجموعة المثل (CH₃) لذرة الهيدروجين في جزيء الأثيلين، شكل (1-4).

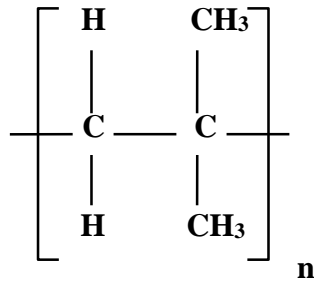


شكل (1-4) مونومير البولي بروبلين

يميل البولي بروبلين إلى التجسيم النوعي (Stereospecific) مع جميع مجاميع المثل على جانب واحد من سلسلة البوليمر. وهذا سيؤدي إلى التبلور، أي أن البوليمر سيمتلك صلابة أكبر من البولي أثيلين. ان تكلفة البولي بروبلين أكثر قليلاً من البولي أثيلين، لكن صلابته العالية تعني انه يمكن يُستخدم في صنع الأجزاء التي تتعرض للأحمال. يمكن قولبته بطواعية في آلات القولبة بالحقن ويستخدم في صناعة أنواع مختلفة من المنتجات؛ كالتقاني، الحبال، الأجزاء المستخدمة (Appliance Parts)، وما شابه ذلك. بصورة عامة فان مقاومته الكيميائية جيدة وهي أفضل من البولي أثيلين، لذلك فان تطبيقاته في الآلات تميل إلى استخدامه كأجزاء كالخزانات، مجاري الهواء وما شابه ذلك. انه لا يمتلك مقاومة للبلى (Wear Resistance) والتي يمتاز بها البولي أثيلين الفائق الوزن الجزيئي.

(3) البولي بيوتيلين (Polybutylene)

يصنع البولي بيوتيلين من البولي أيزوبيوتيلين (Polyisobutylene)، وهو احد نواتج التقطير (Distillation) للنفط الخام (Crude Oil). حيث يصنع في مدى واسع من الأوزان الجزيئية ليعطى خصائص مختلفة وكثيرة، من السائل اللزج إلى المادة الشبيهة بالمطاط. يمتلك جزيء المونومير مجموعتان من المثليل (CH_3) تحل محل ذرتي هيدروجين في جزيء الأنتيلين الأساسي، كما مبين في الشكل (2-4).



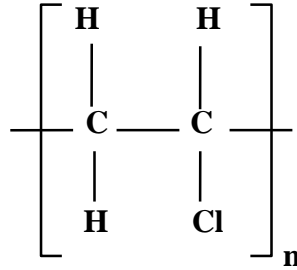
شكل (2-4) مونومير البولي بيوتيلين.

ان من أهم استعمالات البولي بيوتيلين هو في صناعة مطاط البيوتيل (Butyl Rubber)، والذي يستخدم كمطاط، كمادة إضافة لتكوين الحشية (Caulking Compound) والتي تستخدم في تحشية ألواح السفينة أو كمادة لاصقة. في الحالة التي يكون فيها على شكل سائلاً لزجاً (Polyisobutylene)، يمكن مزجه بزيت البترول لصناعة الزيت الذي يكون من النوع الذي لا يغادر السطح. هذا المنتج يباع غالباً في مخازن السيارات كمادة إضافة للزيت. وفي الآلات، يستفاد من مطاط البيوتيل في صناعة الحشيات (Gaskets) ومانعات التسرب (Seals)، وكمادة مضافة للزيت تعيد في تزليق الأعمدة الدوارة للجلبة الخطية (Linear Bushing).

(4) البولي فينيل كلورايد (Polyvinyl Chloride)

ان الاسم الشائع للبولي فينيل كلورايد هو (البي في سي) (PVC)، وقد أُكتشف في عام (1935 م). حيث يصنع من تفاعل غاز الأستيلين (C_2H_2) مع حامض الهيدروكلويك بوجود عامل محفز مناسب. يحتوي مونومره على ذرة كلور تحل محل ذرة هيدروجين واحدة، كما مبين في الشكل (3-4). حيث تتراوح درجة البلمرة (n) فيه ما بين (300-1500) جزيء. (ألبي في سي) المُلدن هو المادة المتعارف عليها باسم الفينيل و يستخدم في صناعة البضائع الاستهلاكية، كالملابس الواقية من المطر و الجلد الصناعي (Imitation Leather). و يستخدم كذلك في صناعة السيارات كمواد للتجيد (Upholstery). كذلك يعتبر من أكثر المواد استخداماً في

صناعة عوازل الأسلاك الكهربائية. بدون المُلدن، (ألبي في سي الصلب) يستخدم بصورة واسعة في صناعة الأنابيب قليلة التكلفة. حيث يمكن وصله باللصق، و التركيبات (fittings) وأنابيب (PVC) ممكن أن توجد في أغلب مخازن الأدوات المعدنية.

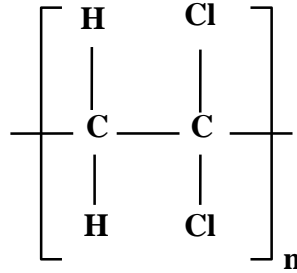


شكل (3-4) مونومير البولي فينيل كلورايد.

يعتبر من المواد الحساسة جداً للثلمات (Notch) وضعيف نسبياً، لذلك يجب أخذ الحذر لمنع تخدش السطح ويجب إسناد الأنابيب بمساند كافية. يعتبر (ألبي في سي) الجاسيء (Rigid PVC) الذي يكون في شكل صحائف أو أشرطة، مفيداً جداً في صناعة قادوس الآلات، الواقيات، المجاري (Ductwork) وحالات أخرى في التطبيقات الغير الهيكلية. هذه الأنواع من الأجزاء يمكن أن تُصنع باللحام بالهواء الحار للأجزاء المنشورة (المقطوعة بالنشر). يمتلك كلا النوعين المُلدن والجاسيء مقاومة كيميائية ممتازة، لكن مقاومتها للمذيبات ليست جيدة كمقاومة البولي أثيلين. يحتوي بوليمر الـ (PVC) التجاري على (5-10%) أشكال بلورية، وهي نسبة صغيرة من الجزيئات المنتظمة. وكثافة البوليمر هي ما بين (1.3-1.8 g/cm³) وهي أعلى من البولي أثيلين أو البولي بروبيلين.

5) البولي فينيل أيدين كلورايد (Polyvinylidene Chloride)

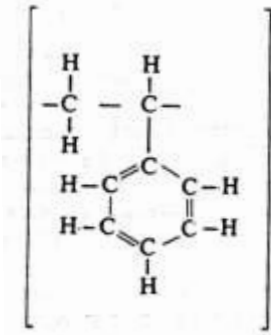
ان الاسم الشائع للبولي فينيل أيدين كلورايد هو ألبي في دي سي (PVDC)؛ ويُصنع من التريكلوروأيثان (Trichloroethane)، وهو المذيب الشائع. إن مونومير الـ (PVDC) يتألف من ذرتي كلور تحل محل ذرتي هيدروجين في جزيء الأثيلين، كما مبين في الشكل (4-4). يستخدم في التطبيقات المنزلية في التعبئة (Packaging) و يستعمل في التطبيقات الصناعية كاستعمالات الـ (PVC). بالرغم من ذلك فان له صلابة، مقاومة حرارية، ومقاومة للمذيبات أفضل من الـ (PVC). يُفضل في صناعة



شكل(4-4) مونومير البولي فينيل أيدين كلورايد.

6) البولي ستيرين (Polystyrene)

انه البوليمر المعروف للجميع بأنه (البوليمر الزهيد الثمن) والذي يستخدم في صناعة ألعاب الأطفال والذي ينكسر بسهولة. يُصنَّع من بنزين الأثيل (Ethylbenzene) حيث تحل حلقة كبيرة من البنزين محل ذرة الهيدروجين في مونومير الأثيلين. ان وجود هذه الحلقة في السلسلة سيكسبها التصلب (Stiffening). وهذا هو السبب في انكساره بسهولة، حيث لا تسمح بنيته إلا بانحراف صغير فيها. إن بنية البولي ستيرين مبينة في الشكل (4-5).



شكل(4-5) مونومير البولي ستيرين.

بالرغم من أن الستيرين يتبلر ذاتياً بالحرارة في جو خالٍ من الأوكسجين، إلا أنه تضاف إليه المُحفِّزات للبلمرة الكاملة عند الدرجات الحرارية المنخفضة. ان هذه المُحفِّزات تشمل مركبات كاتيونية أو أيونية أو مركبات زيجلر أو البيروكسيدات. حيث يتم الحصول على معدلات عالية من البلمرة باستخدام المُحفِّزات الأيونية.

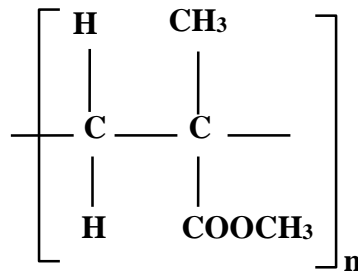
وبسبب مقاومته الضعيفة للأحمال الفجائية، فان استخداماته محدودة في صناعة الآلات. يستخدم كمادة رغوية (Foam) ويطلق عليه ستايروفوم (Styrofoam) للاهتمامات الصوتية وكعازل حراري إلا انه من النادر ان يستخدم كأجزاء في الآلات المقولبة. عندما يشترك البولي ستيرين مع الأكريلونايترال (Acrylonitrile) يصبح مفيداً بعض الشيء؛ ولكن عند تلدينه مع

الأكريلونايتيرال والبيوتادين (Butadiene)، سنحصل على بوليمر يمتلك خواصاً ميكانيكية ممتازة.

يطلق عليه في هذه الحالة بالـ (ABS) وهي الأحرف الأولى لمكوناته التي تتألف من الأكريلونايتيرال والبيوتادين والستيرين. تصنع أبدان غالبية الهواتف من الـ (ABS) الذي يمتلك خواص قولبة جيدة، ويمكن قولبته بالتفريغ لصناعة المبيبات (Housing) وما شابهها في الآلات.

7 (البولي مثيل ميثا أكريليت (Polymethyl Methacrylate))

يشير الاسم الطويل المعقد إلى بوليمر متآلف مع الجميع. يستخدم البولي مثيل ميثا أكريليت في صناعة صفائح المواد الشفافة في (النوافذ الغير القابلة للكسر)، وللعصيات المنخفضة الكلفة في صناعة الكاميرات، الأضواء الومضية (Flashlights)، والزجاج الآمن. يمكن تمييزه من أسمه التجاري البليكيكسجلاس (Plexiglas) أو البرسبكس. الاسم الآخر الشائع الذي يستخدم للبوليمرات التي أساسها البولي مثيل ميثا أكريليت هو الأكريليك (Acrylics). الأكريليك هو عبارة عن أيستر (Ester) يحصل عليه من تفاعل حامض كالمثيلاأكريليك (Methylacrylic) $\{CH_2=C(CH_3)COOCH_3\}$ مع الكحول. المونومير هو عبارة عن استبدال مجموعة مثيل (CH_3) لذرة هيدروجين في جزيء الأثيلين و $(COOCH_3)$ تستبدل (من الحامض) ذرة هيدروجين أخرى، كما مبين في الشكل (4-6).



شكل (4-6) مونومير البولي مثيل ميثا أكريليت.

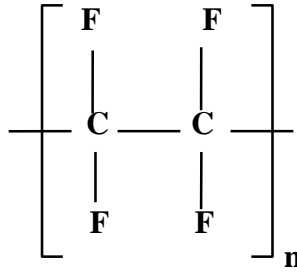
يعتبر الأكريليك من المواد الجاسئة (Rigid) والشفافة، مما يجعله مفيداً عند استخدامه كدروع للآلات (Guard)، زجاج المراقبة (Sight Glass)، و الأغشية، هنالك استعمال كبير آخر هو في الطلاءات. يستخدم في صناعة أجزاء الديكورات نظراً لكونه صقيل وشفاف (الشيلاك) (Clear Lacquers)، وتضاف إليه الصبغات (Pigments) لاستخدامه في الدهانات (Paints).

للاهتمامات العامة، فإن أغلب الأسنان الاصطناعية تُصنع من الأكريليك حيث ان هذه المادة

يمكن قولبتها بالحقن بطواعية.

(8) فلوريد الكربون (Fluorocarbons)

وهذا هو آخر البوليمرات الاثنية التي سوف تناقشها، فالفلوركربون هي عائلة من البوليمرات التي أساسها إحلال ذرات الفلور محل جميع ذرات الهيدروجين في مونومير الاثيلين. إن أقدم فلوروكربون هو البولي تترافلوروأثيلين (Polytetrafluoroethylene) والذي اسمه التجاري المألوف هو التفلون (Teflon). و يصنع بواسطة بلمرة غاز مع نفس الاسم الكيميائي، حيث ان الاسم المختصر له هو (PTFE). يمتلك المونومير ذرة فلور تستبدل كل ذرة من ذرات الهيدروجين في الاثيلين، كما مبين في الشكل (4-7).



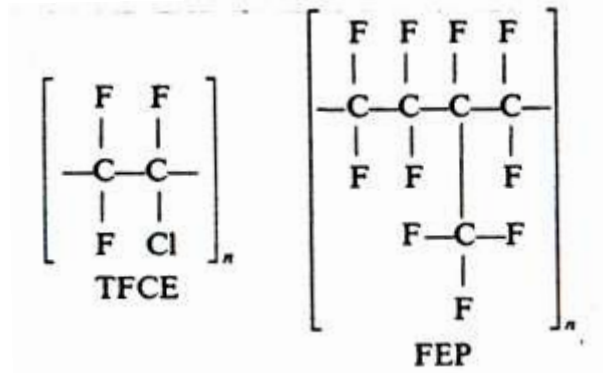
شكل (4-7) مونومير البولي تترافلورو أثيلين.

يعتبر التفلون (PTFE) احد أكثر المواد اللدائنية المعروفة بالخمول الكيميائي، لذلك تستخدم في صناعة الإحكامات (مانعات التسرب) (Seals)، الأنابيب، الأواني الصغيرة التي تستخدم لاحتواء أكثر المواد الكيميائية خطورة. ان إحدى مُحددات استخدامه الرئيسية هي غلاء ثمنه، وكونه غير قابل للقولبة بالطرائق التقليدية، بالإضافة الى صلابته المنخفضة. يجب عدم استخدامه في التطبيقات الهيكلية للمركبات.

ان الخاصية المميزة الأخرى التي يمتلكها التفلون هي قابليته على عدم الالتصاق بالمواد ومعامل احتكاكه المنخفض. فخاصية عدم الالتصاق جعلته مفيداً في صنع قذور الطبخ وعبوات الأدوية و المواد الغذائية. إن امتلاكه لخاصية معامل الاحتكاك الواطيء جعلته يستخدم كفلم جاف للتزليق و انزلاق السطوح. ان العديد من الجسور الكبيرة يتم إسنادها بوسائد مصنوعة من التفلون لكي تسمح بتمدها وتقلصها.

وللتغلب على مشكلة قولبة التفلون بالحقن، تم تطوير فلوروكربون جديد؛ بولي ترايفلوروكلورو أثيلين (Polytrifluorochloroethylene) أو (TFCE)، و بوليمر مشترك من (PTFE) و أثيلين واسمه المختصر (ETFE)، هيكسافلوروبروبيلين (Hexafluoropropylene) أو (FEP) وعدة فلوروكربون تم قولبتها بالحقن. يستبدل مونومير الـ (TFCE) ثلاثة ذرات فلور وذرة

كلور، أما مونومير الـ (FEP) فهو توليفة من الأثيلين و البروبلين مع احلال ذرات الفلور محل ذرات الهيدروجين، كما مبين في الشكل (4-8).



شكل (4-8) مونوميرا الـ (TFCE) و الـ (FEP).

ان التضحية التي نقدمها مقابل تسهيل قولبته هي انخفاض مقاومته الكيميائية وانخفاض مقاومته الحرارية. ان هذه البوليمرات مثل الـ (PTFE)، تستخدم فقط للتطبيقات الخاصة، عندما لا تستطيع البوليمرات القليلة التكلفة من الإيفاء بالغرض.

الخلاصة

1. غالبية البوليمرات الأيثانية تمتلك سلاسل هياكلها خطية و تفرعاتها وروابطها المستعرضة هي بالحد الأدنى.
2. غالبيتها هي من نوع الترموبلاستيك وقابليتها للتشكيل والقولبة جيدة.
3. هنالك ثلاث بوليمرات اثنينية هي الأكثر استخداماً وهي البولي أثيلين، البولي بروبلين، والبولي ستيرين حيث تشمل (60%) من البوليمرات المستخدمة عالمياً.
4. جميعها أساسها جزيء الأثيلين وغالبيتها يتم الحصول عليها من النفط الخام.
5. تستخدم جميعها كأجزاء في الآلات في تطبيقات مختلفة، لكنها لا تستخدم غالباً في التطبيقات الهيكلية.

4-2-2 أسيتات السليلوز (CA)

تتوفر هذه المادة اللدائية بأشكال مختلفة ونظامية كالصفائح والقضبان والأنابيب. كما يمكن ان تتوفر كحبيبات جاهزة للقولبة. ان اللون الطبيعي لحبيبات هذه المادة هو الأبيض الحليبي المائل للزرقة ولا مذاق لها ولا رائحة. وقد دخلت هذه المادة في مجال صناعة اللدائن نظراً لمتانتها وصلابتها العاليتين. إلا ان أهم عيوبها هي ضعف قدرتها على تحمل الظروف الجوية.

ولكن على الرغم من ذلك فان لها تطبيقات مفيدة في الصناعات والأدوات المنزلية. يمكن قولبة هذه المادة باستخدام آلات البثق والحقن والضغط والقولبة الانتقالية. أما اذا كانت متوفرة على شكل صفائح فانه من المناسب جداً حينئذ قولبتها بالتشكيل الحراري وباستخدام الضغط التخلخي.

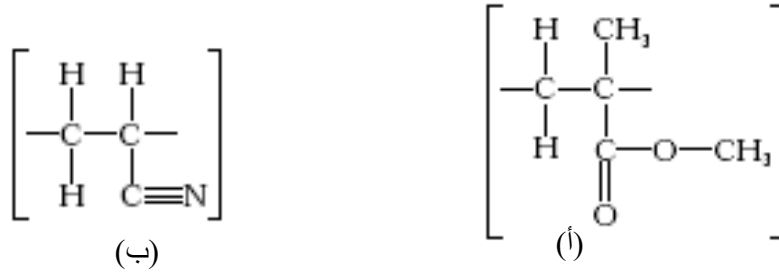
ان أهم استخداماتها هي في صناعة أفلام التصوير الفوتوغرافي والأشعة السينية وأشرطة تسجيل الكاسيت كما تستخدم كذلك في صناعة لعب الأطفال والنظارات الواقية والأدوات اليدوية.

4-2-3 زيدات أسيتات السليلوز (CAB)

وتختلف هذه المادة عن المواد السليلوزية الأخرى ببعض الخصائص كمقاومتها الأفضل للتغيرات الجوية المحيطة وأستقرارية أبعادها وماتنتها الصدمية الجيدة عند درجات الحرارة المنخفضة. فبالإضافة إلى خصائص التصنيع الجيدة لها وامتلاك منتجاتها سطوحاً لماعة. تقولب عادة باستخدام آلاتي البثق والحقن وتستخدم لقولبة الصفائح والأنابيب والزجاج الواقي وبعض المعدات اليدوية. كما تستخدم كذلك في صناعة إشارات ولوحات المنازل ولوحات الإعلانات وفي بعض التطبيقات الصناعية.

4-2-4 ميثا أكريلات البولي مثيل (PMMA)

وهو بوليمر ينتمي إلى عائلة الأكريليكات اللدائنية الحرارية وتتبلر بوليمرات الأكريليك بشكل عام من المواد البترولية الخام والبولي بروبيلين. وقد تم بلمرة العديد من البوليمرات الأكريليكية الأساسية مع بعض المونوميرات كالأكريلونتريل للحصول على البولي أكريلونتريل (PAN) أو مع المثيل للحصول على الميثا أكريلات البولي مثيل (PMMA)، شكل (4-9). وغيره، لغرض الحصول على خصائص جديدة كقابلية الانحناء الكبيرة. نتيجة لدرجة نقاوتها العالية ومواصفاتها الهندسية الجيدة وسهولة قولبتها فان لدائن الأكريليك تحتل مركزاً هاماً في مجال الصناعات اللدائنية.



شكل (4-9) أ) مونومير الميثا أكريلات البولي مثل (PMMA)؛
ب) مونومير البولي أكريلونتريل (PAN).

تتمتع لدائن الأكريليك بمقاومة جيدة لتغيرات الظروف البيئية وناقليتها الجيدة للضوء وتمتاز بقابليتها للتلوين فلونها الطبيعي هو أبيض حليبي ولكن يمكن الحصول عليها بألوان شفافة وبراقة.

كما تتوفر الأكريليكات على شكل صفائح مصبوبة ويتم إنتاجها من المونوميرات السائلة المتبلمرة كصفائح الزجاج المصقولة. كما يمكن ان تتوفر على شكل أنابيب وقضبان و صفائح قياسية مبنوقة. هذا ويمتلك الأكريليك مواصفات هامة أخرى أهمها:

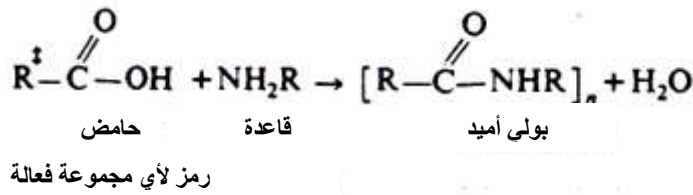
1. نقطة التلدين المنخفضة ($71^{\circ}\text{C} - 93$).
2. استقرارية الأبعاد ممتازة.
3. ذو سطح لامع.
4. مقاومته للخدوش ضعيفة.
5. صلابة ومتانة عاليتين.
6. ذو مقاومة عالية للصدمات.
7. يمكن استخدامه كلاصق ممتاز.
8. مواصفاته الكهربائية جيدة.
9. قليل الامتصاص للرطوبة.
10. يتأثر ببعض المواد الكيماوية كالجاذولين وسوائل التنظيف.
11. ليس له رائحة.

تعتبر لدائن الأكريليك من اللدائن الغير مهينة للاستخدام الواسع بالطرائق التقنية للتصنيع نتيجة لكلفة إنتاجه العالية. ويمكن تشكيل الصفائح المصنوعة من الأكريليك لمختلف المنتجات مثل لوحات الإعلانات والإشارات الضوئية ونوافذ أقبية الطائرات والمركبات والجدران الشفافة. ومن تطبيقاته الأخرى هي استخدامه في صناعة العدسات وهياكل الأجهزة المرئية والصوتية والأضواء

الخلفية للسيارة والأوعية والفرش الأرضية. كما تستخدم قضبان وألياف الأكريليك لنقل الضوء من مصدر واحد إلى العديد من عدادات القياس المدرجة في لوحة قيادة السيارة. فالأكريليك يستطيع التقاط الضوء ونقله عبر المنحنيات.

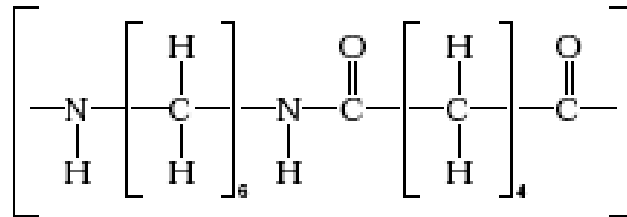
5-2-4 البولي أميد (النايلون) (Polyamides)

ان المصطلح نايلون هو الاسم الشائع لراتجات البولي أميد وهي أشكال من البولييمرات التي نحصل عليها بالتكثيف لحامض وقاعدة. وهي عبارة عن مجموعة معقدة وسلسلة طويلة من البولييمرات المتحصلة من التفاعل الرئيسي الذي يتضمن تكوين البولي أميد ، شكل (4-10).



شكل (4-10) التفاعل الرئيسي لتكوين البولي أميد.

هنالك عدد من أنواع البولي أميد الشائعة؛ الأنواع المختلفة تصمم كنايلون 6، نايلون 6/6، شكل (4-11)، نايلون 10/6... الخ. هذه الأرقام تشير إلى عدد ذرات الكربون في كل مادة متفاعلة مشمولة في عملية التكثيف أو البلمرة. لقد تم الإبقاء عليها كمعاملات للتمييز بين أنواع النايلون المختلفة.



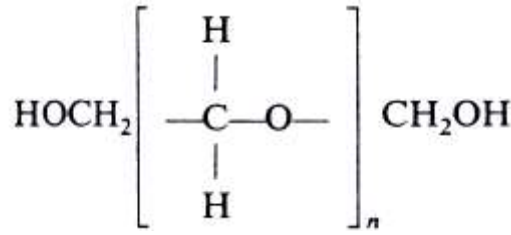
شكل (4-11) مونومير النايلون 6/6.

لقد استخدمت الأجزاء المصنوعة من النايلون بشكل واسع في الآلات وهياكل المكونات، الجلب (Bushing)، التروس، والحديدات (Cams). انه يمتلك صلابة تتفوق على جميع البولييمرات الأثنية. وأحد عيوبه الرئيسية هي قابليته لامتصاص الرطوبة وحدث تغير حجمي فيه.

6-2-4 البولي أسيتال (Polyacetals)

يختلف البولي أسيتال عن العديد من البولييمرات الأخرى في كون جزيء بوليمره يمتلك أصرة كربون-أوكسجين. تتكون وحدة المونومير الأساسية من فورمالديهايد (Formaldehyde) حقيقي

وسلاسل البوليمر لها مجموعات نهائية، شكل (4-12).

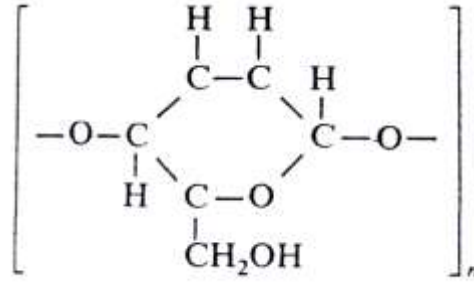


شكل (4-12) مونومير الأسيال.

ان استخدام المصطلح بولي أوكسيميثيلين (Polyoxymethelene) هو الأكثر صحة لهذا البوليمر، لكن الاسيتال هو مصطلح عام مقبول. هنالك مصنعون قليلون للبولي أوكسيميثيلين كمادة هوموبوليمر، وهنالك بوليمر مشترك واحد يصنع بالتشارك (Copolymerization) مع التريوكسين (Trioxane). يستخدم الاسيتال بنفس استخدامات النايلون في الآلات. يمتلك قابلية عالية للتبلور ويمتلك خواصاً ميكانيكية جيدة، ويتفوق على النايلون في مقاومته لامتصاص الرطوبة. ويُنتج بنفس طريقة النايلون وهي القولبة بالحقن.

4-2-7 السليلوز (Cellulosics)

ان السليلوز هو مادة طبيعية تُصنع منها حاجاتنا الكثيرة، وجزء السليلوز (المونومير) هو معقد بعض الشيء، والترابط يتم بواسطة ترابط الأوكسجين ليكون البوليمر، الشكل (4-13).



شكل (4-13) مونومير السليلوز.

ان أكثر أنواع السليلوز استعمالاً هو بروبينيت أسيتات السليلوز (Cellulose Acetate Propionate). من النادر ان تستخدم نترات السليلوز في يومنا هذا نظراً لقابليتها العالية للاشتعال. ان أسيتات السليلوز هي غالباً مادة من نوع الترموبلاستيك تستخدم في صناعة الأقلام والألياف. يتم إنتاج الأيستر (Ester) وهو ملح عضوي من تفاعل السليلوز مع حامض الخليك (Acetic Acid). عندما يخلط بروبينيت أسيتات السليلوز مع بيوتيريت أسيتات السليلوز (Cellulose Acetate Butyrate) مع الأيستر ستتحسن الخواص الميكانيكية والفيزيائية بالمقارنة مع أسيتات السليلوز. أنها مواد ترموبلاستيك وتمتلك خصائص جيدة للقولبة،

لذلك سنجد لها تطبيقات واسعة في الاحتياجات المنزلية حيث تنتج بواسطة القولية بالحقن والتشكيل بالتفريغ. ان إشارات الطريق المضاءة بالمصابيح الفلورية (Fluorescent Lights) هي غالباً ما تشكل حرارياً من بيوتيريت أسيتات السليلوز. ان أحد المواد الشائعة للسليلوز هو السليلوز المنتج بالعملية اللزجة (Viscous Process) فالاسم المألوف للمنتج النهائي لهذه العملية يسمى بالرايون (Rayon) (وهو حرير يصنع من السليلوز). النوع الأخر الشائع للسليلوز هو السيلوفان (Cellophane)، الذي يستخدم في التغليف، حيث ينتج كذلك بعملية إعادة توليد السليلوز اللزج.

عموماً، يعتبر السليلوز من مواد الترموبلاستيك الرخيصة الثمن وتمتلك خصائص جيدة للقولية، قابلة للتلون، مقاومة للبيئة. ان تطبيقاته الرئيسية هي مجال الأغراض المنزلية أكثر مما في الآلات والصناعة.

4-2-8 البولي يستير (Polyester)

ان مصطلح البولي يستير يماثل مصطلح الصلب الكربوني في المعادن، فكما أن هنالك العديد من أنواع مختلفة من الصلب الكربوني تختلف بخواصها، كذلك بالنسبة للبولي يستير فهنالك أنواعاً عديدة وبخواص مختلفة. فكما اشرنا سابقاً إن الأيستر هو ناتج تفاعل حامض مع كحول. هنالك أنواع متعددة من الحوامض والكحوليات التي يمكن أن تُركب سوياً لتكون البولي يستير. فالبولي يستير ممكن أن يكون لدائن من نوع الترموبلاستيك أو الترموستنك، اعتماداً على طبيعة التفاعل بين الحوامض والكحوليات. ان التطبيق المميز جداً للبولي يستير هو في الطلاء، فإذا أردت أن تقرأ اللصقة التي توضع على علب الطلاء، ستجد أن العديد من محتوياتها ستألف من راتنجات الألكيد (Alkyd Resins). هذا المصطلح يأتي من الحروف الأولى للكحول (Al-cohol) و الحروف الأخيرة للحامض (A-cid)، وهذا يعني أنه بولي يستير. عندما يستخدم في الطلاء، يتم إجراء تعديلاً عليه باستخدام الزيوت والمذيبات للحصول على خواص الطلاء المرغوب فيها بالإضافة إلى خصائص الجفاف.

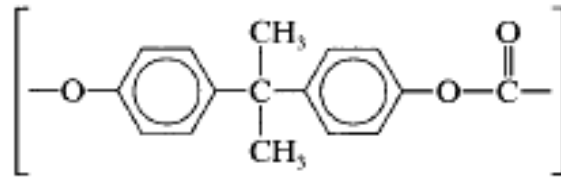
ربما أكثر أنواع البولي يستير تطبيقاً هي في استخدامه كراتنج مع الألياف الزجاجية. حيث يضاف المُحَفِّز قبل حدوث الترابط المستعرض بين جزيئات راتنج البولي يستير الخفيفة الوزن نسبياً، ليكون متصلباً حرارياً و صلباً. وتمتلك المواد المركبة خصائص استثنائية للنسبة بين الصلابة إلى الوزن، لذلك فيمكن أن تستخدم في صناعة صهاريج الخزن، الأنابيب و ألواح البناءات.

يتوفر البولي يستير الخطي كمادة ترموبلاستيك يمكن قوليتها بالحقن، تُشكّل إلى أفلام، وتستخدم كألياف. باستخدام الشد الميكانيكي، ففلم البولي يستير يمكن أن ينجز فيه كمية مميزة

من التبلور مؤدياً ذلك الى زيادة صلابته بشكل استثنائي. ان استخدامه في صناعة الحبال والأنسجة المقاومة للتمزق هي خير دليل للصلابة العظيمة التي يمتلكها هذا البوليمر. لقد تم قبول استخدام البولي يستر الخطي مؤخراً في التصميم الميكانيكي. وبالرغم من ذلك فليس هنالك محل للتساؤل حول قيمة البولي يستر في تشكيل الألياف الزجاجية الطبقيّة، فان النسبة بين الصلابة/الوزن تتفوق حتى على الصلب.

4-2-9 البولي كربونيت (Polycarbonates)

البولي كربونيت هو بولي يستر حقيقي، شكل (4-14) حيث انه أستر لحامض الكربونيك (Carbonic Acid) و بيزفينول أروماتك (Aromatic Bisphenol).

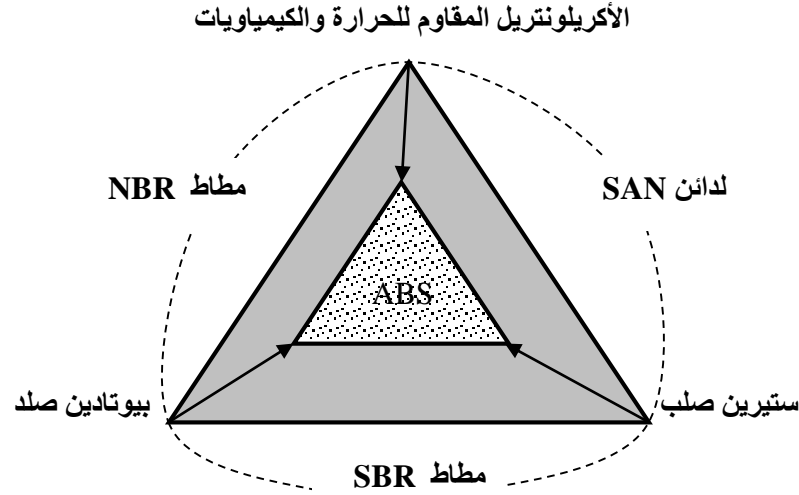


شكل (4-14): مونومير البولي كربونيت.

البولي كربونيت هو عبارة عن بولي يستر خطي يمتلك قابلية معتدلة للقوية وله خواص ممتازة لتحمل الصدمات. إن التوافق بين مقاومة الصدمات ومقاومة الحرارة والشفافية جعلته مناسباً لنفس تطبيقات الاكريليك؛ كدرع حماية، يحل محل الزجاج... الخ. ولكن بسبب كلفته الأعلى من الاكريليك، لذلك فهو يستخدم فقط في الحالات التي تتطلب مقاومة للصدمات. يستخدم بصورة واسعة في صناعة الخوذ والدروع. أما بالنسبة للتطبيقات الهيكلية فهو مشابه بخواصه للنايلون و الأستالات.

4-2-10 الأكريلونتريل بوتادين ستيرين (ABS)

انه أحد المواد اللدائنية التي تنتمي الى عائلة الستيرين، حيث يتألف من مونوميرات الستيرين والأكريلونتريل ومطاط البوتادين، كما مبين في الشكل (4-15).



شكل (4-15): يوضح العلاقة بين اللدائن ومركبات المطاط في صناعة اللدائن من نوع ABS.

وبتغيير نسبة الأكريلونتريل والبيوتادين في مادة الأبي أس (ABS) ، سيمكننا من الحصول على مجال واسع من المواد اللدائنية المختلفة النوعية والموصفات. ان أهم ما يتميز به هذا النوع من اللدائن هو الوزن المنخفض والصلابة الجيدة والمتانة العالية والمقاومة الجيدة للحرارة و الجو والمواد الكيماوية بالإضافة الى ثبات أبعاده إلا انه قابل للاشتعال. بالإضافة الى قابلية التلون الغير محدودة واللمعان العالي التين تجعلانه مادة مناسبة جداً لتطبيقات الزخرفة. فهو مقاوم جيد للقلويات والحوامض إلا انه يمكن ان يتصدع عندما يتعرض الى حمض قوي او مذيبيات عضوية. ويمكن خلط الـ (ABS) أو تغليفه بالـ (PVC) لتحسين من مقاومته للهب في بعض التطبيقات.

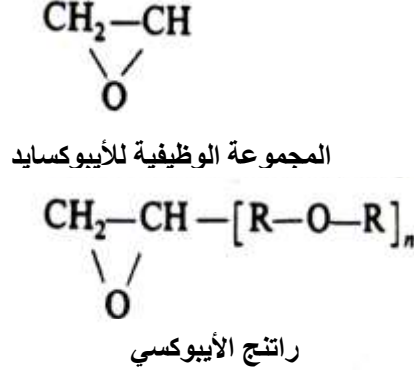
يستخدم الـ (ABS) في صناعة أبدان الراديو والتلفزيون وبعض التطبيقات المنزلية الأخرى.

3-4 اللدائن المتصلبة حرارياً (الثرموستك) (TS)

1-3-4 الأيبوكسيدات (Epoxyes)

تحصل هذه العائلة من البوليمرات على اسمها من المجموعة النهائية التي تقع في نهاية سلسلة البوليمر. خلافاً لكل البوليمرات التي نوقشت سابقاً، فإن هذه البوليمرات تمتلك سلاسل قصيرة الطول (وزن جزيئي صغير). ولكن عندما يضاف المُصلد إليها، فان السلاسل الخطية القصيرة (والتي قد تصل إلى 10 مونوميرات) ستتربط بروابط مستعرضة، فيصبح المُصلد بالإضافة إلى السلاسل الخطية بشكل بنية واحدة مترابطة بروابط مستعرضة. إن أكثر المصطلحات صحة لهذا البوليمر هو البولي أثير (Polyether)، لأن وحدات المونومير تمتلك

بنية من نوع الأثير الذي تكون الصيغة العامة له (R—O—R). ان مجاميع الأيبوكسايد (Epoxide Groups) هي المجاميع النهائية التي تعطي لهذه العائلة من البوليمرات هذا الاسم، وصيغتها كما مبينة في الشكل (4-16) هي:

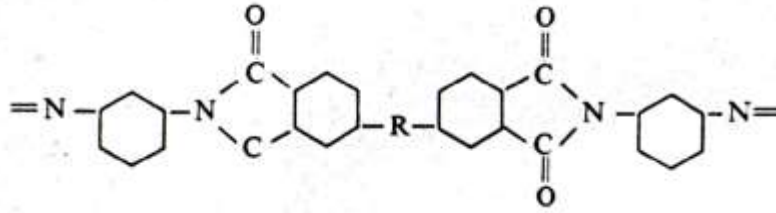


شكل (4-16) مونومير الأيبوكسي

ان الخصائص الاستثنائية للأيبوكسيدات تكمن في عملية التصليد أو الترابط الاستعراضي التي يصاحبها تغير قليل جداً في الحجم الفيزيائي. ويحدث ذلك نتيجة لكون المصلد سيصبح كجزء من البوليمر. ان معدل الانكماش الذي يحصل فيه هو حوالي (0.1 μm/cm)، فالانكماش المنخفض سيؤدي إلى التصاق الأيبوكسي بقوة مع السطوح الأخرى. وعندما تضاف حشوات إليه كمسحوق الألمنيوم أو حشوات شبيهه، سيصبح راتنج مفيد وسنتمكن من قولبته بالسباكه لصنع المثبتات (Fixtures)، الموجهات (Jigs)، والعُدَد. تصنع الطبقات النسيجية الزجاجية مع الأيبوكسي لتوضع فوق طبقات البولي يستر عندما يُرغب في لصق الطبقات مع المعدن أو مادة شبيهه غير مسامية. ان الأيبوكسيدات هي مواد لدائنية من نوع الثرموستك وتمتلك مقاومة عالية للحرارة.

4-3-2 البولي إمايد (Polyimide)

البولي إمايد هي جزء من مجموعة البوليمرات المقاومة للحرارة العالية والتي حصل عليها تجارياً في عام 1970. حيث انها تمتلك بنية معقدة جداً، وتتألف من روابط كربونية حلقية، كما مبينة في الشكل (4-17).

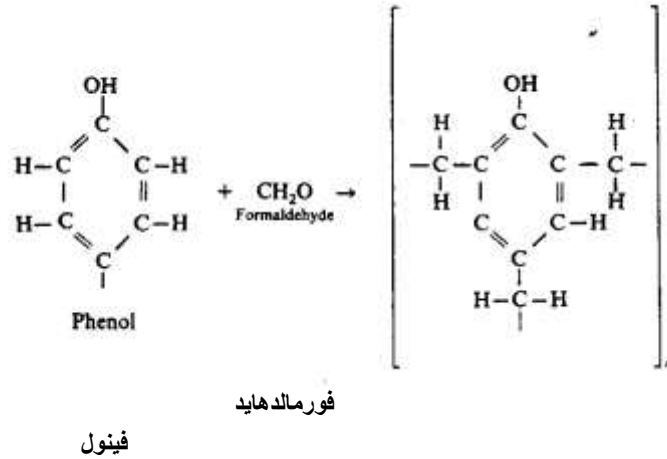


شكل (4-17) مونومير البولي إماميد

ان المادة الابتدائية لهذا البوليمر هي الديانهايدرايد بيرميليتك (Pyromellitic Dianhydride) و ديامين أروماتك (Aromatic Diamines). هذا النوع من البوليمرات يمكن ان تصنع لتكون من لدائن من نوع الثرموستك أو الثرموبلاستيك. فالبولي إماميد المتصلب حرارياً (الثرموستك) يُعد من أكثر المواد اللدائنية المعروفة بمقاومتها للحرارة. إذ يمكن ان يتحمل درجات حرارية تفوق (260°C) لفترة طويلة، ويتحمل درجة حرارة تفوق (482°C) لفترات متقطعة. بسبب بنيته هذه، فإنه لا يمكن صهره وانسيابه كما تفعل معظم مواد الثرموستك والثرموبلاستيك. تتطلب بعضها استخدام تقنيات المساحيق المعدنية، حيث تصنع بعض الأجزاء بكبس (Compaction) البوليمرات إلى تكون على شكل تكتلات حبيبية (Granular) ومن ثم تُنيد المكبوس في الفرن فتصهر هذه التكتلات الحبيبية وتتحول إلى جسم صلب متجانس. ان التطبيقات الحالية لها في الصناعات تتمثل في فواصل الركائز المتدرجة الكروية، مانعات التسرب الميكانيكية، والمكونات المنزقة الأخرى. لتحسين الخصائص الاحتكاكية، يتم تحشية البولي إماميد بعوامل تزيق مثل (PTFE) وكبريتيد المولبدنيوم (Molybdenum Disulfide). من الجدير بالذكر ان البولي إماميد من نوع الثرموبلاستيك لا يمتلك مقاومة حرارية كالبولي إماميد من نوع الثرموستك.

3-3-4 الفينولات (Phenolics)

الفينولات هي احد أقدم عوائل البوليمرات من نوع الثرموستك، وقد تم اكتشافها بواسطة العالم باكلاند (Bakland) في عام (1909م)، لذلك أطلق عليها أسم باكلايت (Bakelites). إن بوليمر فورمالدهايد الفينول (Phenol Formaldehyde) هو عبارة عن تفاعل كثير الروابط المستعرضة ينتج من الفينول، وهو عبارة عن بنية حلقية من الكحول، والفورمالدهايد، كما مبينة في الشكل (4-18). ونتيجة لترابط المونوميرات من خلال الثلاث روابط غير المشبعة بالكربون، سيؤدي ذلك إلى ترابط مستعرض عالي وينتج عن ذلك بوليمر جاسيء (Rigid).



شكل (4-18) التفاعل الذي ينتج عنه فورمالدهايد الفينول.

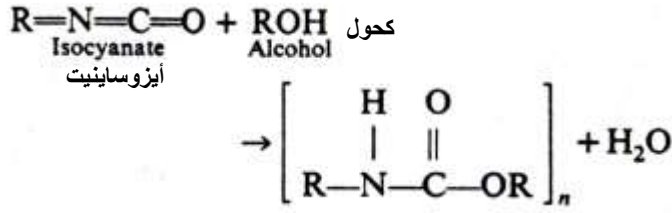
ينتج عن تفاعل البلمرة بالتكثيف بين الفينول والفورمالدهايد نوعان من اللبوليمرات: أحدهما يسمى نوفولاكس (Novolacs) والآخر يُسمى ريزولز (Resols)، ويتم التكثيف في وسط قاعدي، أو وسط حامضي، لينتج عنهما نوعان من اللبوليمرات.

وعندما يتفاعل الفينول مع الفورمالدهايد في وسط حامضي بكميات متماثلة جزئياً أو في وجود زيادة طفيفة من الفينول، ستنتج كحولات بنزلية، ثم تحدث بلمرة فيما بينها، مكونة وصلات ميثيلينية. ومع ازدياد التكثيف ستتكون مركبات ذات سلاسل طويلة. تكون المُحفّزات الحامضية في حالة وجود زيادة من الفينول، بشكل لدائن خطية تذوب في الكثير من المذيبات العضوية وهذا النوع من اللدائن يكثر عليه الطلب في صناعة البويات والطلاءات.

ان الفينولات هي راتنجات من نوع الترموستك، يمكن قولبتها فقط بالقولبة الانضغاطية. وتستخدم في شكلها المقولب في صناعة العوازل الكهربائية، المفاتيح الصفائحية، والصناديق الكهربائية. وتستخدم كمنتج طبائقي مع الزجاج، النسيج، الورق، الأسبستوس، أو الجنفاص (Canvas)، ويجد تطبيقات واسعة في المكونات الميكانيكية مثل: التروس، الحدبات، الجلبات، وما شابه ذلك. حيث تمتلك المنتجات الطبائقية صلابة انضغاطية عالية تتفوق فيها على أي بوليمر (قد تصل إلى 269 MPa). ان المنتجات الطبائقية الرقيقة تستخدم بصورة واسعة في صناعة اللوحات الخاصة بالدوائر الكهربائية بسبب امتلاكها لخصائص العزل الكهربائي الجيدة.

4-3-4 البولي يوريثين (Polyurethane)

البولي يوريثين هو ناتج التكثيف لتفاعل أيزوساينيت (Isocyanate) بالصيغة العامة (R=N=C=O) مع الكحول (ROH)، وكما مبين في الشكل (4-19).



شكل(4-19) التفاعل الذي ينتج عنه البولي يوريثين.

يمكن أن نضع بوليمرات مختلفة باستخدام تفاعلات مختلفة للمواد. الصفة الفريدة التي يمتلكها البولي يوريثين هو إمكانية تصرفه كثرموستك للإلاستومر (مطاط) أو كصلب جاسيء. يمكن للإلاستومر القابل للسباكة أن يُصمّم ليناسب تطبيقات معينة بواسطة إجراء تغيير بسيط على المادة المتفاعلة. يمكن استخدام القوالب المعدنية البسيطة، وانجاز البلمرة بالتسخين إلى درجة حرارة مقاربة إلى (260 °C). ويمكن أن تصنع الدرافيل المكتسبة بالمطاط، على سبيل المثال، بواسطة سكب راتنج اليوريثين في داخل أنبوب يحيط بالأسطوانة المراد أكسائها (بحيث تكون الأسطوانة بالقلب)، ثم تطبخ، وتجرى عليها عملية تجليخ للحصول على القطر المطلوب. أما منتجات كالصفائح والطوب فيمكن أن تصنع ببساطة بواسطة سكب الراتنج في داخل قوالب معدنية مؤقتة وقليلة التكلفة. يمكن الحصول على صلادة لمنتجات البولي يوريثين تتراوح ما بين (30 A - 88). وتمتلك جميع هذه المواد الصلادة خواص الإلاستومرات، فيمكن أن تستخدم في نوابض القالب، قوالب التشكيل، وسائد للبلبي (Wear Pads)، وما شابه ذلك.

الخاصية المميزة الأخرى التي يمتلكها البولي يوريثين هي قابليته على تكوين الرغوات (Foams). إن أحد منتجات عملية تفاعل التكثيف الذي يشمل تكون اليوريثين، ينتج عنها ثاني أكسيد الكربون. فتحول ثاني أكسيد الكربون إلى غاز يمكن أن يكون كافياً ليحدث الرغوة بشكل سريع. هذا سيكون مفيداً عند رش الرغوة العازلة في البناءات. حيث يتم خلط الراتنج الأساسي في البوق (Nozzle) خلال عملية الرش. بهذه الطريقة يمكن الحصول على طبقات رغوية سميكة عازلة. وليست هنالك حاجة إلى إجراء معاملات حرارية لإتمام الإنضاج.

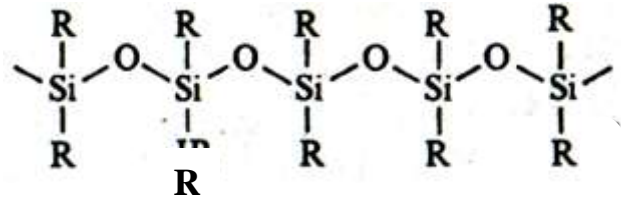
إذا كانت الحاجة هنالك حاجة إلى مادة رغوية مرنة ولينة، يمكن حينئذ الحصول عليها مرة أخرى بتغيير كيميائيات التفاعل. غالبية وسائد الأثاث هي من نوع رغويات البولي يوريثين اللين. أما الرغوات العالية الكثافة فيمكن استخدامها في صناعة وسادات لوحة عدادات السيارات. وتستخدم الرغويات الجاسئة والصلدة كبدايل عن الخشب في صناعة الأثاث. إذا توفرت القوالب الكافية وتم التحكم في العملية، فيمكن أن نحصل على حبيبات وكثافة مشابهة تماماً للخشب.

ان التطبيق الأخير للبولي يوريثين والذي لاقى رواجاً واسعاً في الصناعة هو استخدامه في الطلاء. لقد تم استخدام ورنيش اليوريثين (Urethane Varnishes) لفترة طويلة، لكنه طور

حالياً لكي يستخدم بسمك يتراوح ما بين (2 mm - 10) لتغطية الأرض. المقاومة الممتازة للحك (Abrasion) لهذه المادة في المدى الصلد المطاطي، جعلتها مناسبة في تغطية الأرض لأنها تتحمل حركة العربات، السير، والتشطي.

4-3-5 السليكونات (Silicones)

هذه العائلة من البوليمرات هي حقاً فريدة النوع بالمقارنة مع جميع البوليمرات الأخرى التي ناقشناها سابقاً. وتعتبر من أصعب المواد اللدائنية في تحديدها وتمييزها، وهي متوفرة بأشكال مختلفة فقد تتوفر بشكل راتجات نقيه أو مطاط أو لاصق أو سوائل. حيث أن هذه البوليمرات لا تتألف سلسلتها الرئيسية (Backbone) من ذرات الكربون. فبوليمرات السليكون أو الأكثر صحة هي البولي أرغانوسيلكسان (Polyorganosiloxanes)، تتميز بأن سلسلتها الرئيسية تتألف من الأوكسجين والسليكون مرتبطين مع مجاميع عضوية وظيفية (R)، كما مبين في الشكل (4-20).



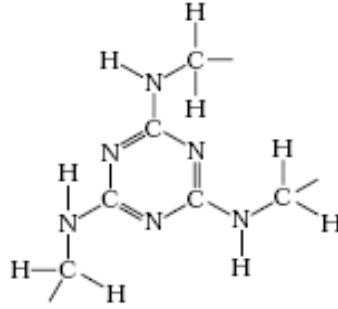
شكل (4-20) سلسلة بوليمر السليكون.

يمكن أن تُصنع بوليمرات السليكون على شكل زيوت، مواد ثرموبلاستيك، إلاستومرات ومواد ثرموستتك جاسئة. ان استخدام الصناعة في الوقت الحالي مُركّز على تصنيعه كزيوت والإستومرات.

بما أن السليكونات هي مواد تشير إلى الكوارتز (SiO_2)، لذلك فهي تمتلك خصائص حرارية تتفوق فيها على أغلب البوليمرات الأخرى. تستخدم مُزلاقات السليكون في مديات حرارة تتراوح ما بين (84°C - إلى 149°C). ويستخدم غالباً كعامل لتحرير قالب وكزيت تخلطي عالي الحرارة. السليكونات كالإلاستومرات تمتلك مدى واسع في درجات الصلادة وهي مشابهة لليورثينات في ذلك. ولكن صفاتها الفريدة تكمن في إمكانية استخدامها لمستويات درجات حرارية ربما قد تصل إلى (316°C). يمكن أن تصنع مواد ممتازة من راتجات السليكون القابلة للسباكة، حيث تستخدم في صناعة المكونات الكهربائية، أجهزة منع التسرب الحرارية (الاحكامات)، يمكن استخدامه كحشيات (Gaskets) لدرجات الحرارة العالية.

4-3-6 الميلايين فورمالديهايد (MF) واليوريا فورمالديهايد (UF)

ويعتبران من أهم المركبات التي تنتمي الى عائلة الأمينو اللدائنية المتصلبة حرارياً (الثرموستتك). ويتم إنتاجها عن طريق تفاعل الميلايين أو اليوريا مع الفورمالديهايد، شكل(4-21).



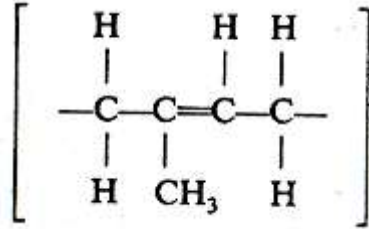
شكل(4-21) مونومير الميلايين فورمالديهايد.

يشترك هذان المركبان بخصائص تتفوق على بقية اللدائن من حيث النقاء وسهولة تلويينها. وكلا النوعين يمكن تقويتها باستخدام الحشوات كمنشارة الخشب أو الألياف الزجاجية أو مواد تقوية أخرى من أجل تقليل هشاشيتها. أهم ما يتميز به هذين المركبين هو الصلادة العالية ومقاومة الخدش وتبدي سطوح منتجاتها المقولبة لمعاناً مميزاً. وتتميز كذلك بمقاومتها لسوائل التنظيف والزيوت وباقي المنظفات الشائعة الاستخدام، وتستطيع الصمود أمام درجات الحرارة ما بين (83°C) و (-51°C) ولفترات طويلة. تتميز كذلك بثبات أبعادها الجيدة وخصائصها الكهربائية الممتازة أيضاً.

4-3-7 الإلاستومرات (Elastomers)

يستخدم مصطلح الإلاستومر ليصف البوليمر الذي يمتلك نفس خواص المطاط. فمصطلح الإلاستومر مأخوذ من كلمة المرونة (Elastic) وهي قابلية المادة على الرجوع إلى أبعادها الأصلية عند إزالة الحمل المُسلط عليها، وكلمة مير (Mer) التي تستخدم في كيمياء البوليمر لتشير إلى الجزيء. فتعريف المطاط، هو المادة التي يمكنها على الأقل أن يحدث فيها استطالة مقدارها (200%) عند إجراء اختبار الشد عليها وتستطيع أن تستعيد بسرعة وبقوة أبعادها الأصلية عند زوال الحمل المُسلط. ليس جميع الإلاستومرات تناسب تعريف المطاط، لأن الاستعادة في بعض أنواعه ليست سريعة. فالتعريف الأكثر مناسبة إلى الإلاستومرات هو أنها مواد بوليمرية تمتلك معدل استطالة أكبر من (100%)، وتمتلك أيضاً مقداراً مميزاً من الرجوعية (Resilience). مصطلح الرجوعية يشير إلى قابلية المادة على الاسترجاع من الانحراف المرن. تقاس الرجوعية بواسطة كمية الطاقة المفقودة أثناء الانحراف. المواد التي تمتلك رجوعية عالية،

عندما تسقط من مرتفع على سطح جاسيء فإنها سوف ترتد غالباً بنفس الارتفاع الأصلي. بعض البوليمرات التي تم مناقشتها سابقاً ممكن أن تكون إلامتورات، وليس من الضروري مناقشتها هنا بالتفصيل، لكن من المهم أن نشير إلى الخصائص العامة لها. فالإلامتورات التي تتصرف كالمطاط ويمكن أن يعزى تصرفها هذا إلى التفرع أو الترابط المستعرض لجزيئات البوليمر. هنالك صنفان أساسيان من المطاط هما: الطبيعي و الصناعي. يُحصل على المطاط الطبيعي من الأشجار عند تعرضها للانفعال، وغالباً من المناطق الاستوائية، حيث تخرج مادة حليبية يمكن تركيزها لتكون المادة الابتدائية للمطاط الطبيعي. أن بنية معظم المطاط الطبيعي الشائع هو البولي أيزوبرين (Polyisoprene)، كما مبين في الشكل (4-22).



شكل (4-22) البولي أيزوبرين (المطاط الطبيعي).

هنالك أنواع عديدة من الإلامتورات، تختلف في خواصها وتركيبها الكيميائي وليس هنالك مجال لوصف كل منها. ان معظم المصممون يحتاجون أن يتعاملوا مع خمسة أنواع من المطاط: المطاط الطبيعي، النيوبرين (Neoprene) أو المطاط الصناعي، السليكون، البولي يوريثين، والفلورو إلامتور (Fluoroelastomers) ومثال على ذلك الفيتون (Viton).

1) المطاط الطبيعي (Natural Rubber)

عندما يكون كمادة خام، فان المطاط الطبيعي هو ببساطة على شكل سائل (Sap) يحصل عليه من الأشجار بعد إزالة الرطوبة منه. وبملاك خواص ميكانيكية ضعيفة؛ ويكون دبق (Tacky)، واستخداماته في الصناعة محدودة. يحول المطاط الطبيعي شأنه شأن العديد من المطاطات الصناعية و الإلامتورات إلى منتج يمكن الاستفاده منه بإضافة بعض الإضافات إليه والتي تليها عملية الفلكنة. تطحن هذه الإضافات بالعمل المستمر مع المواد الابتدائية خلال مجموعة من الاسطوانات الملساء بواسطة عجن (Masticating) المادة الخام في ماكينة خلط ذات قدرة كبيرة. في هذه العملية ربما تضاف، عوامل التلوين، عوامل الإنضاج، بالإضافة إلى الحشوات. يستخدم الكبريت في معظم أنواع المطاط الطبيعي ليعزز الخطوة الأخيرة في عملية التصنيع وهي الفلكنة، وتشمل عملية الفلكنة خلط المادة الابتدائية و تسخينها إلى درجات حرارية

قد تصل إلى (150°C ~)، وعادة ما تستخدم قوالب من الصلب الكربوني للحصول على الشكل المطلوب. ان عملية الفلكنة هي تفاعل للحصول على الروابط المستعرضة والتي تعمل على ترابط السلاسل والتي تكون مسئولة عن الخواص العامة للإلاستومرات.

(2) المطاط الصناعي (Synthetic Rubbers)

لقد ناقشنا مسبقاً فوائد البولي يوريثين كمادة مقاومة لحك السطوح، تغطي الأسطوانات، وتستخدم في نوابض القوالب. المطاط الطبيعي يمتلك خصائص الاستطالة الاستثنائية. تمتلك الفلورو إلاستومرات أفضل مقاومة للحرارة والمواد الكيميائية الخطرة. الأوزون (O_3) هو هواء جوي هو احد اغلب الأعداء الداخليين للإلاستومرات وهو سبب تدهوره عندما يستخدم في صناعة الإطارات وماسحات الزجاج في السيارات. يمتلك المطاط الطبيعي مقاومة ضعيفة للأوزون؛ البولي كلوروبرين (Polychloprene) أو النيوبرين (Neoprene) والفلورو إلاستومرات تمتلك مقاومة جيدة جداً للأوزون والبيئة. إلاستومرات السليكون كما تم مناقشتها سابقاً، مفيدة للتطبيقات التي يتعرض فيها المنتج إلى درجات حرارية عالية. ان معظم الإلاستومرات الأخرى، كالبولي أيزوبيتالين، النيترايل (Nitrile)، البولي سلفايد (Polysulfide)، البولي بيوتادين والأنواع الأخرى تستخدم في صناعة مانعات التسرب، الحلقات (O-Rings)، الحشيات، والأجزاء المماثلة. هنالك مقارنة بين خواص بعض أنواع المطاط مبينة في الجدول (2-4) بالإضافة الى ان خواص بعض البوليمرات مبينة في الجدول (3-4). الاستخدام الفعال لمعظم الإلاستومرات في غالبية التطبيقات التصاميمية ممكن إنجازها باستخدام البولي يوريثين، المطاط الطبيعي (البولي أيزوبرين)، السليكون، النيوبرين، و الفلوروإلاستومرات.

جدول (4-2) خواص أنواع المطاط الشائعة.

طاط المليكون	مطاط البولي أوكليك	التيتانيول بوتا أن	نيوبرين	بوتا أس (GR-S)	البيوتيل (GR-)	المطاط الطبيعي	الخواص
80-40	90-50	100-45	90-30	100-40	90-40	100-40	مدى الصلابة (Shore "A")
900	1500	4000	3500	3500	3000	4500	جهد الشد (psi)
250	200	700	1000	600	900	900	قصى استطالة، %
فقيرة	متوسطة	ممتازة	جيدة جداً	ممتازة	جيدة	ممتازة	مقاومة الحك
ممتازة	جيدة	ممتازة	جيدة	ممتازة	متوسطة	جيدة	مقاومة الانضغاط عند درجة C 70
ممتازة	جيدة	ممتازة	متوسطة	ممتازة	ضعيفة	ضعيفة	مقاومة الانضغاط عند درجة C 121
ممتازة	ممتازة	ممتازة	ممتازة	ممتازة	ممتازة	جيدة	مقاومة التعيق (درجة حرارة اعتيادية)
304	204	149	107	135	135	71	مقاومة الحرارة محيطية C °، قصى درجة حرارة محيطية C °، مسموح بها
ممتازة	ممتازة	متوسطة	ممتازة	متوسطة	جيدة جداً	متوسطة	مقاومة الجو والأوزون
ضعيفة	ممتازة	متوسطة	ممتازة	جيدة	ممتازة	ممتازة	مقاومة المرونة
			جيدة جداً	متوسطة	ممتازة	متوسطة	مقاومة انتشار الغازات

مقاومة الشد	معامل التمدد الحراري	المذيبات العضوية	القواعد القوية	الحوامض القوية	الحوامض الضعيفة	أقصى درجة حرارة يمكن ان يعمل بها بدون حمل	الصلادة	مقاومة الصدم	مقاومة الإنضغاط	معامل مرونة الشد	الوزن النوعي	اسم البوليمر
1.7	5.5	م	م	مقاوم	م	550	52D	3.0	1.2	0.5	2.2	PTFE
3.5	9.5	م	م	مقاوم	م	400	58D	لا يتكسر	1.6	0.6	2.15	FEP-مشتق
2.5	3.8	ج	م	مقاوم	م	380	R110	3.5	2.0	2.5	2.1	TFCE
2.2	4.5	م	م	تواجه بواسطة الحوامض المؤكسدة	م	150	M85	0.4	13.0	4.0	1.2	بولي ميثيلين الأكريليك
6.7	4.5	م	م	مقاوم	م	275	R108	1.5	4.9	4.0	1.1	نايلون 6/6
5.0	4.7	م	م	مقاوم	م	195	M94	1.4	5.2	5.2	1.4	بولي أسيتال
3.8	1.1	مض	م	مقاوم	م	220	M80	1.3	4.5	4.1	1.4	بولي أسيتال-مشتق
8.0	2.5	م	م	مقاوم	م	250	M70	16.0	12.5	3.5	1.2	بولي كربونيت
7.5	1.1	ج	م	تواجه قليلاً بواسطة الحوامض المؤكسدة	م	500	E99	0.5	40.0	7.5	1.4	البولي إيميد الدرجة X-X
			تق		ت.ق	325	M105	0.5	34.0	15.0	1.3	النيون الدرجة G2

تابع للجدول (3-4)

الخاصية	اختبار ASTM	الوحدات الانجليزية	تضرب في	لتحول الى الوحدات العالمية SI Units
الوزن النوعي	D792	-	-	-
معامل التمدد الحراري	D696	10^{-5} in./in.°F	1.8	10^{-5} cm/cm.°C
أجهاد الشد	D412	ksi	6.895	MPa
معامل المرونة في الشد	D638	10^6 psi	6.895	kPa
مقاومة الانضغاط	D695	ksi	6.895	MPa
مقاومة الصدمات	D256	ft lb/in.	0.533	J/cm
الصلادة	D785	-	-	-
أقصى درجة حرارة للخدمة	لا توجد	°F	$32 - (°F)$ $0.556 \times ($	°C
مقاومة المواد الكيميائية م: مقاوم ج: جيدة ض: ضعيفة ت.ق: تهاجم قليلاً	لا توجد			

أسئلة الفصل الرابع

1. صف المواد المتبلمرة التالية:
 - أ. البولي أثيلين
 - ب. البولي بروبيلين
 - ج. البي في سي
 - د. البولي ستيرين
2. ما هي الصفة الفريدة التي يتميز بها البولي تترافلورو أثيلين والمعروف تجارياً بالتقلون عن بقية البوليمرات؟
3. ما هي أوجه التوافقات بين جميع البوليمرات الأيثانية؟
4. يعتبر مصطلح البولي يستير في البوليمرات مماثل لمصطلح الصلب في المعادن. ناقش هذه العبارة؟
5. ما الذي تتميز فيه الإيبوكسيدات عن البوليمرات الأخرى، ناقش ذلك؟
6. ما هي الصفة الفريدة التي يمتلكها البولي يورثين؟
7. تعتبر السليكونات من العوائل البوليمرية الفريدة بالمقارنة مع جميع البوليمرات، ما الذي تتميز به عن البقية؟
8. ما هو اللدن (ABS) وكيف يمكننا الحصول عليه؟ وما هي أهم خصائصه؟
9. ما هو المطاط الصناعي وما الأسباب التي تدعه يتدهور؟

الفصل الخامس

البوليمرات المستخدمة في المكونات الإنشائية

Polymers for Structural Components

1-5 مقدمة:

إن الهدف من هذا الفصل هو التعرف على:

1. كيفية استخدام البوليمرات في التصميم الهندسية
2. أنواع البوليمرات التي ستحل المشاكل التصميمية
3. فهم فوائد وعيوب اللدائن في تطبيقات الهياكل والبلى
4. وضع الخطوط التي تساعدنا في اختيار البوليمر المناسب للطلاء أو الالتصاق.

هنالك تطبيقات عديدة يمكن للبوليمرات أن تستخدم فيها كمثل أي مادة هندسية، إلا إنها لا تمتلك نفس الخواص ولا نفس الخصائص فهي تختلف في ذلك عن المعادن التي غالباً ما تستخدم. فعلى سبيل المثال فإن البوليمرات ستصبح عديمة الفائدة في التطبيقات الإنشائية عند ارتفاع درجة إلى أعلى من (93 °C). هذا هو نوع العامل الذي سوف نركز عليه عند مناقشتنا لاستخدامات اللدائن.

الأمر الآخر الذي سنهتم به هو اختيار البوليمر المناسب للتطبيق المناسب. إن اختيار البوليمر المناسب من بين آلاف الأنواع من البوليمرات ليس أمراً يسيراً. إذا كانت بيانات الخواص المتوفرة لدينا تشير إلى أن إضافة الفضة إلى البولي أميد كحشوة ستعطي خصائص تتفوق على البوليمرات الأخرى، لكنك لا تستطيع الافتراض بأنها ستكون مناسبة للتطبيق الذي تنشده، وربما تجدها متوفرة لدى مُجهّز واحد وكأجزاء مقولبة؛ بينما كل الذي تحتاجه أنت هو صناعة ترس أسطواني. يجب أن نُعطي أولوية اهتمامنا عند الاختيار إلى توفر البوليمرات. لا نستطيع ان نستعمل الراتنجات المقولبة حتى في حالة تصنيعنا (100) جزء، حيث ان العديد منها تشكل ببطيء في عملية القولبة بالحقن. إذا ما هي أنواع البوليمرات المتوفرة لدى المصمم؟

في هذا الفصل سوف نناقش الاستعمالات الهندسية للبوليمرات والتي يمكن ان تتوفر بأشكال قياسية (صحائف، قضبان، أنابيب، أعمدة....الخ) من معظم مخازن تجهيز اللدائن. الجدول(5-5)

1) يبين مجموعة من البوليمرات المتوفرة، وهذه الذخيرة من البوليمرات الهندسية تستطيع ان تحل معظم المشاكل التصميمية. سنستعرض استخدامات وتطبيقات البوليمرات في صناعة الهياكل وأنظمة الانزلاق والتآكل الكيميائي. ان مناقشتنا حول البوليمرات ستتضمن معلومات عن التصميم لتطبيقات خاصة للبوليمرات في الطلاء، اللصق و الإلاستومورات.

جدول(1-5) البوليمرات المتوفرة بسهولة.

• الأكريليكات (بولي مثيل ميثاأكريليت) Acrylics (Polymethyl Methacrylate)
• الأسيكلات (بولي فورمالدهايد) Acetals (Polyformaldehyde)
• النايلون (بولي أميد) Nylons (Polyamides)
• الفينولات (بولي فينولفورمالدهايد) Phenolics (Polyphenolformaldehyde)
• البي في سي (بولي فينيل كلورايد) PVC (Polyvinyl Chloride)
• البي في دي سي (بولي فينيليدين كلورايد) PVDC (Polyvinylidenechloride)
• الفلوروكاربون (بولي تيترافلورو أثيلين) Fluorocarbons (Polytetrafluoroethylene)
• البولي أثيلين Polyethylene
• البولي ستيرن Polystyrene
• البولي يوروثين Polyurethane
• السيليكونات Silicones
• الأيبوكسي Epoxy
• البولي يستير Polyester
• البولي كربونيت Polycarbonate
• الأبي بي أس ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)
• البولي أمايد Polyimide

2-5 أنواع البوليمرات المستخدمة في المكونات الإنشائية

(Polymers For Structural Components)

بالرغم من أن مصطلح الإنشاءات ربما يمثل العنجات (Beams) المصنوعة من اللدائن ذات المساحة المقطعية على شكل الحرف الإنجليزي (I)، إلا أن هذا ليس هو المقصود هنا. فالمكونات الإنشائية هي أي مكون يحمل الحمل المسلط. أين يمكن ان تستعمل اللدائن لتحمل الأحمال في الآلة؟ هذه القائمة تتضمن ما لا نهاية من الأماكن (مثالاً: الحدبات، أذرع التوصيل، التروس، التوابع (Followers)، المثبتات (Fixtures)).

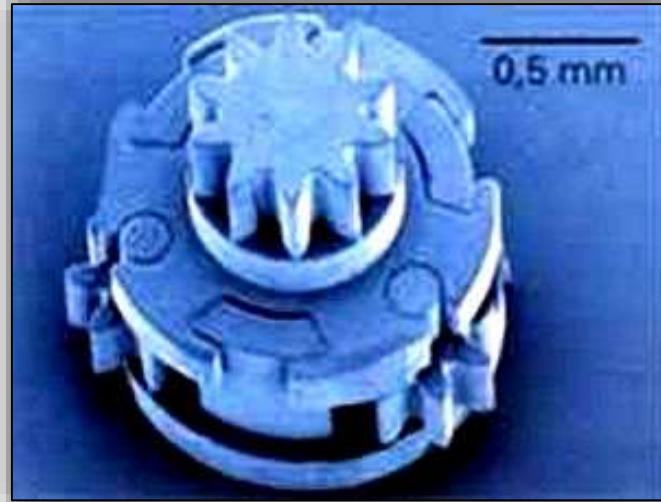
إذا كانت الأحمال من نوع الغير مهمة، أي ان على الجزء إسناد وزنه فقط، فان معظم البوليمرات التي أشرنا إليها في الجدول السابق ستفي بالغرض. ان بعض الأمثلة على التطبيقات

سوف تكون في المبيتات (Housing)، الواقيات (Guards)، القنوات (Ducts)، وأغطية الصفائح. في مثل هذه الحالات ان اختيار البولي ستيرين - عالي درجة الصدم، سيكون اختياراً جيداً. بالرغم من ذلك فان كل نوع من اللدائن سيمتلك فوائد معينة تميزه عن الأنواع الأخرى. الجدول (2-5) يدرج بعض البوليمرات التي يوصى بها لتطبيقات الأحمال المنخفضة، إضافة إلى الخصائص التي تتميز بها عن الأنواع الأخرى.

جدول (2-5) تطبيقات الحمل المنخفض للبوليمرات

البوليمر	الفائدة التي يتميز بها
الأي بي أس (ABS)	توافق جيد بين الصلابة والمتانة
الستيرين (عالي الصدم)	كلفة منخفضة، شفاف، جاسيء
البولي أثيلين (عالي الكثافة)	مقاومة جيدة للتآكل (المذيبات)، كلفة منخفضة
البولي بروبيلين	مقاوم للكلال، مرن، كلفة منخفضة، سهل التشكيل بالتفريغ.
خليطة أكريليك-PVC	سهولة التشكيل بالتفريغ
الأكريليك	مقاومة للبقع (Staining) وشفاف
البي في سي (PVC)	سهل اللحام ومقاوم للحوامض

ان جميع هذه البوليمرات متوفرة بشكل صفائح واغلبها يمكن تشكيلها بالتفريغ (Vacuum Forming) كما مبين في الشكل (1-5). ان الأكريليك هو أكثر البوليمرات التي يمكن تشغيلها ولصقها باستخدام المذيب، شكل (2-5). يمكن قص (ألبي في سي) باستخدام المنشار أو القاطع ويمكن ان يستخدم الهواء الساخن للحامه لتصنيع الخزانات، قنوات الهواء، وأغلفة الصفائح. أما اللدائن الأقل جساءة كالبولي أثيلين والبولي بروبيلين فيمكن قطعهما أو قصهما إلى الأشكال المناسبة.



شكل (1-5) التشكيل بالتفريغ للبي في سي

من المجموعة أعلاه فقط الستيرين والأكريليك هما الهشيين، لذلك يجب تناولهما بحذر أثناء عمليات التصنيع.

إذا كان على الجزء المصمم أن يتحمل حملاً أعظم من وزنه، فمن الضروري البحث في خواص البوليمرات بشكل دقيق. فخلافاً لما هو موجوداً في المعادن، تمتلك البوليمرات خواصاً تتغير بمقدار كبير عند أي تغير بسيط في درجات الحرارة أو الحمل.



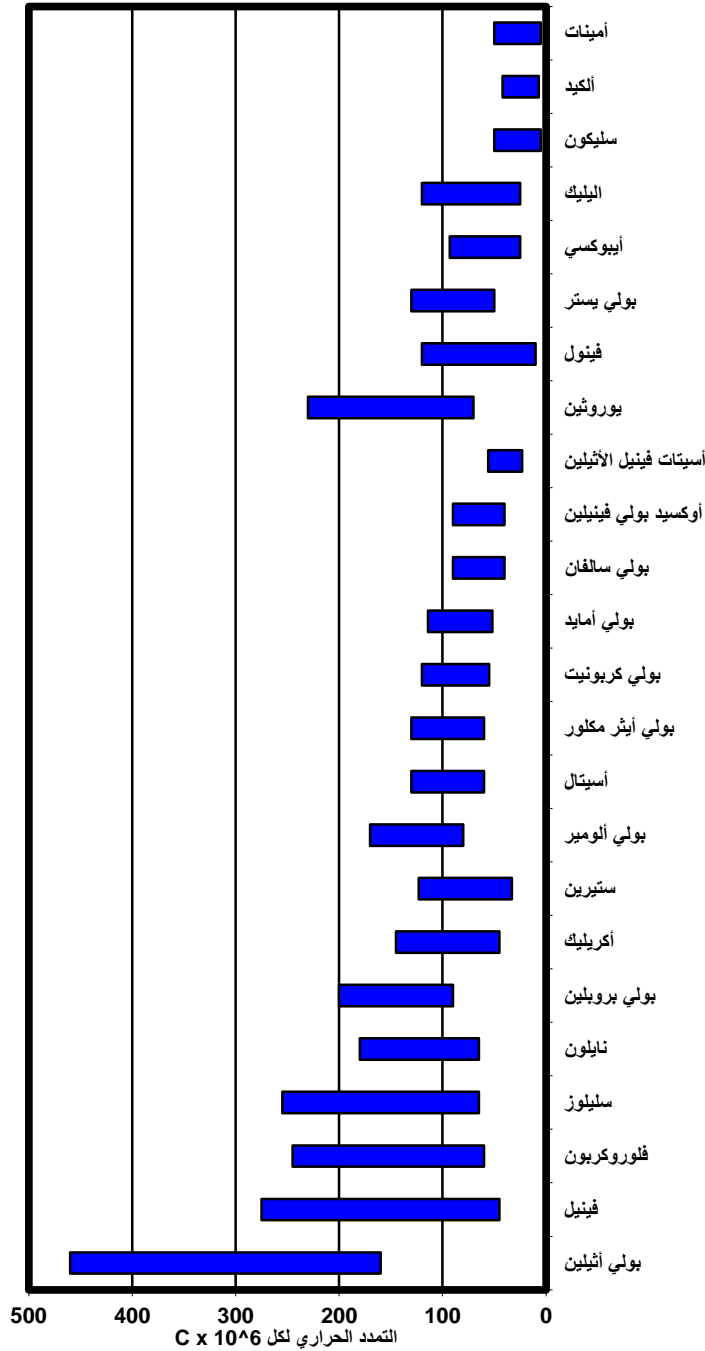
شكل (2-5) واقي للآلات مصنوع من الأكريليك.

فيما يلي بعض المفاهيم التي يجب أخذها بنظر الاعتبار عند تصميمنا للأجزاء البوليمرية المعرضة للأحمال:

1. تتمدد اللدائن بارتفاع درجة الحرارة بمقادير أكثر من المعادن.
 2. جساءة اللدائن أقل من جساءة المعادن.
 3. تتخفف الخواص الميكانيكية لللدائن بمقدار كبير عند ارتفاع درجة الحرارة قليلاً.
 4. تتشوه اللدائن تشوهاً دائماً تحت تأثير الحمل عند درجة حرارة الغرفة وعند إجهاد أدنى من إجهاد الخضوع.
 5. بعض أنواع اللدائن قابلة للاشتعال.
 6. يمكن أن تكون اللدائن حساسة جداً للثلمات (Notches).
 7. لا تتوفر بيانات ومعلومات عن الكلال لللدائن بسهولة.
 8. خواصها ممكن ان تكون غير متماثلة في جميع الاتجاهات (Anisotropic) بصورة كبيرة.
 9. بعض أنواع اللدائن يمكن ان تمتص كميات كبيرة من الرطوبة و يصاحب ذلك تغيراً في الحجم.
 10. الخواص الميكانيكية لللدائن بصورة عامة هي أدنى من المعادن بكثير.
- كل واحد من هذه العوامل هو مهم بما فيه الكفاية ليحذرنا بأخذ الاحتياطات الخاصة.

1-2-5 معامل التمدد الحراري (Thermal Expansion Coefficient)

لا يمكننا إهمال معامل التمدد الحراري عند تصميم الأجزاء اللدائنية. فعند ربطها أو إحكامها مع الأجزاء المعدنية، سيحدث تشوه كبير فيها أثناء عملية التسخين. وعند استخدامها كمحامل، فإن هذا العامل يمكن ان يؤدي إلى التصاق السطحين المنزلقين ببعضهما البعض (Seizure). يقع معامل التمدد الحراري للمعادن ضمن المدى $(9 \times 10^{-6} - 23 \times 10^{-6} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C})$ ، بينما للبوليمرات فإنه في المدى $(9 \times 10^{-6} - 290 \times 10^{-6} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C})$ ، الشكل (3-5). من الجدير بالذكر ان تمدد البوليمرات الخالية من الحشوات يكون (10) مرات أكثر من التمدد الذي يحصل في الصلب الكربوني.



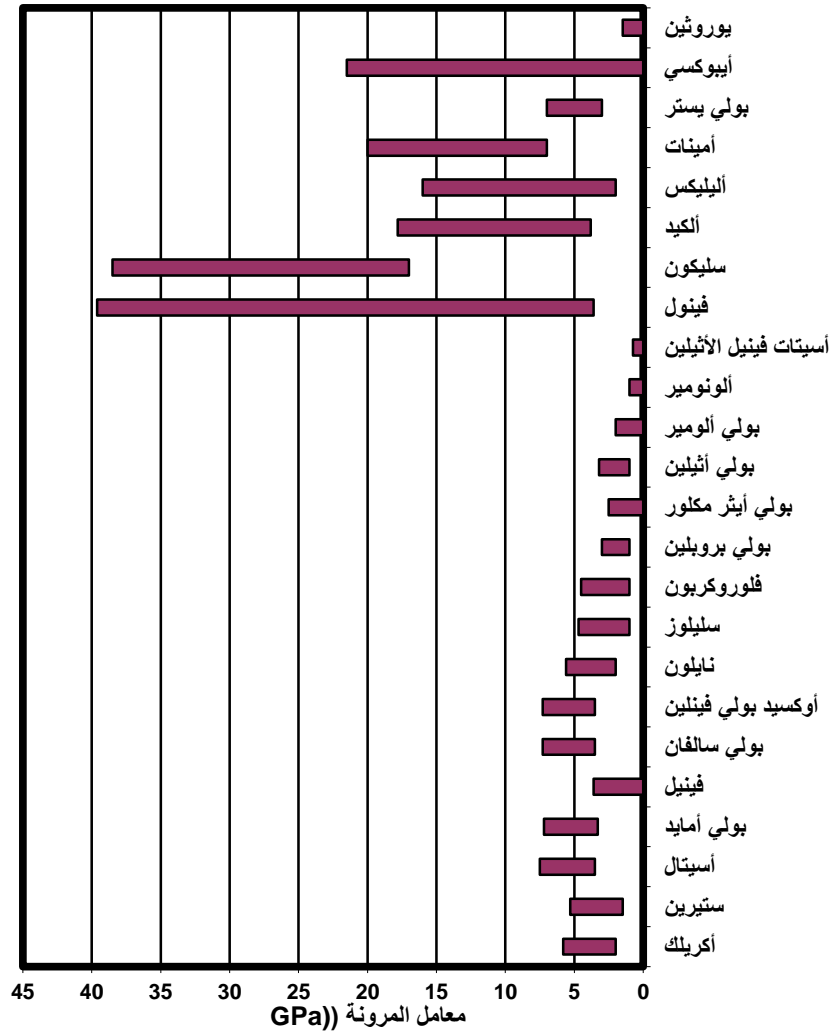
شكل (3-5) خصائص التمدد الحراري للبوليمرات

2-2-5 الصلبيّة أو الجساءة (Stiffness)

توصف هذه الخاصية عادةً في المصطلحات الهندسية بأنها معامل المرونة المقاس بطريقة الشد، لسوء الحظ فإن البوليمرات لا تخضع لقانون هوك. فليس هنالك منطقة تامة للانفعال المرن في مخطط الإجهاد-الانفعال للبوليمرات، لكنها تجربة شائعة لاستخدام ميل منحنى الإجهاد-الانفعال في منطقة الانفعال المنخفض لحساب معامل المرونة.

الشكل (4-5) يبين جدولة لمديات معامل المرونة لبوليمرات مختلفة. كما نستطيع ان نلاحظ من البيانات بان الفينول يمتلك معامل مرونة قدره (35×10^3 MPa) وهو أكثرهم صليبيّة، بينما الألمنيوم الذي يمتلك معامل مرونة مقداره (69×10^3 MPa) يعتبر من المعادن ذوات معامل المرونة المنخفضة. يمتلك الصلب الكربوني معامل مرونة قد يصل إلى غاية (207×10^3 MPa). من وجهة نظر التصميم هذا يعني انه إذا أردنا لجزء من اللدائن ان تكون صليبيته كصليبيّة جزء مصنوع من الصلب ، فان سمكه يجب ان يكون أضعاف سمك الجزء المصنوع من الصلب.

في الحقيقة ان هذه لا تُشكل أي مشكلة، فربما يظهر بأنه بسبب معامل المرونة المنخفض لللدائن فانه سيعتبر أدنى مستوى من المعادن في المكونات الإنشائية. لكننا لو قمنا بقسمة معامل المرونة على الوزن النوعي لإيجاد نسبة الصليبيّة إلى الوزن أو الصليبيّة النوعية، سنجد ان بعض اللدائن المُقوّى يمتلك صليبيّة أعلى وقد تكون مضاهية لصليبيّة الصلب أو الألمنيوم. والخلاصة نستطيع القول بان صليبية البوليمرات هي أقل بكثير من صليبيّة المعادن، ويجب ان نأخذ بنظر الاعتبار الزيادة في الانحراف عند إجراء حسابات

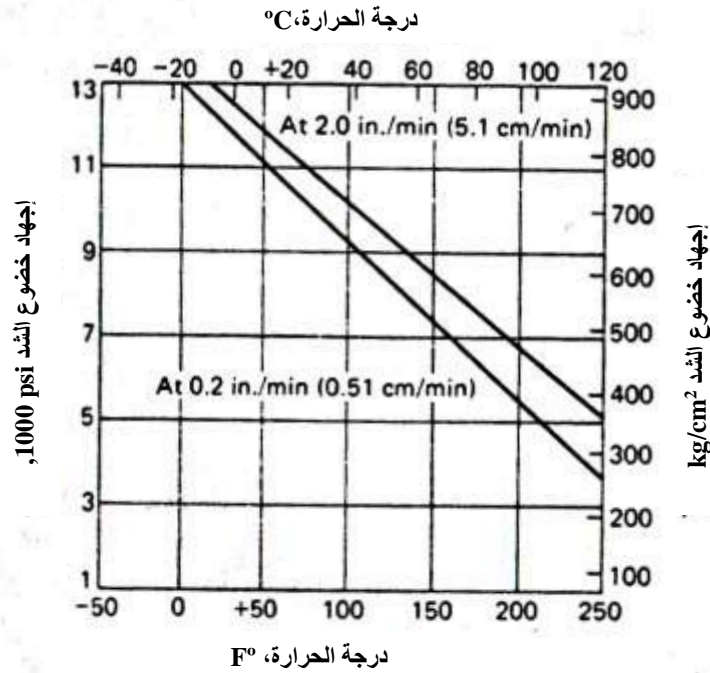


شكل (4-5) معامل المرونة للبوليمرات مقاساً بطريقة اختبار الشد.

التصميم. يجب ان تكون الأجزاء المصنوعة من اللدائن أكثر سمكاً، ولكن هذا لا يعني زيادة الوزن حيث ان معظمها تمتلك كثافات منخفضة.

3-2-5 درجة الحرارة (Temperature)

الشكل (5-5) يبين تأثير درجة الحرارة على اختبار الشد لراتنج الأسيثال. عند تغير درجة الحرارة ستحدث تأثيرات مشابهة لها على معامل المرونة ومقاومة الخضوع و مقاومة الإنضغاط، والصلادة. في أغلب الحالات فان مقاومة الصدمات والاستطالة ستتحسنان. النقطة التي يجب ان تأخذ بنظر الاعتبار للمصممين هي ان البيانات التي أُخذت عند درجة حرارة الغرفة لا يمكن

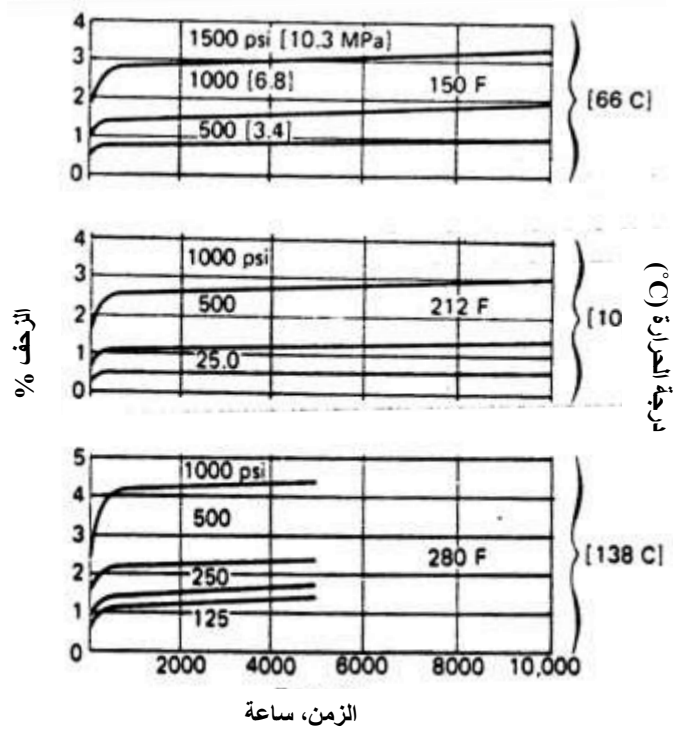


شكل (5-5) تأثير درجة الحرارة على الأسيثال.

استخدامها إذا كان الجزء سيتعرض لأي درجة حرارية أخرى.

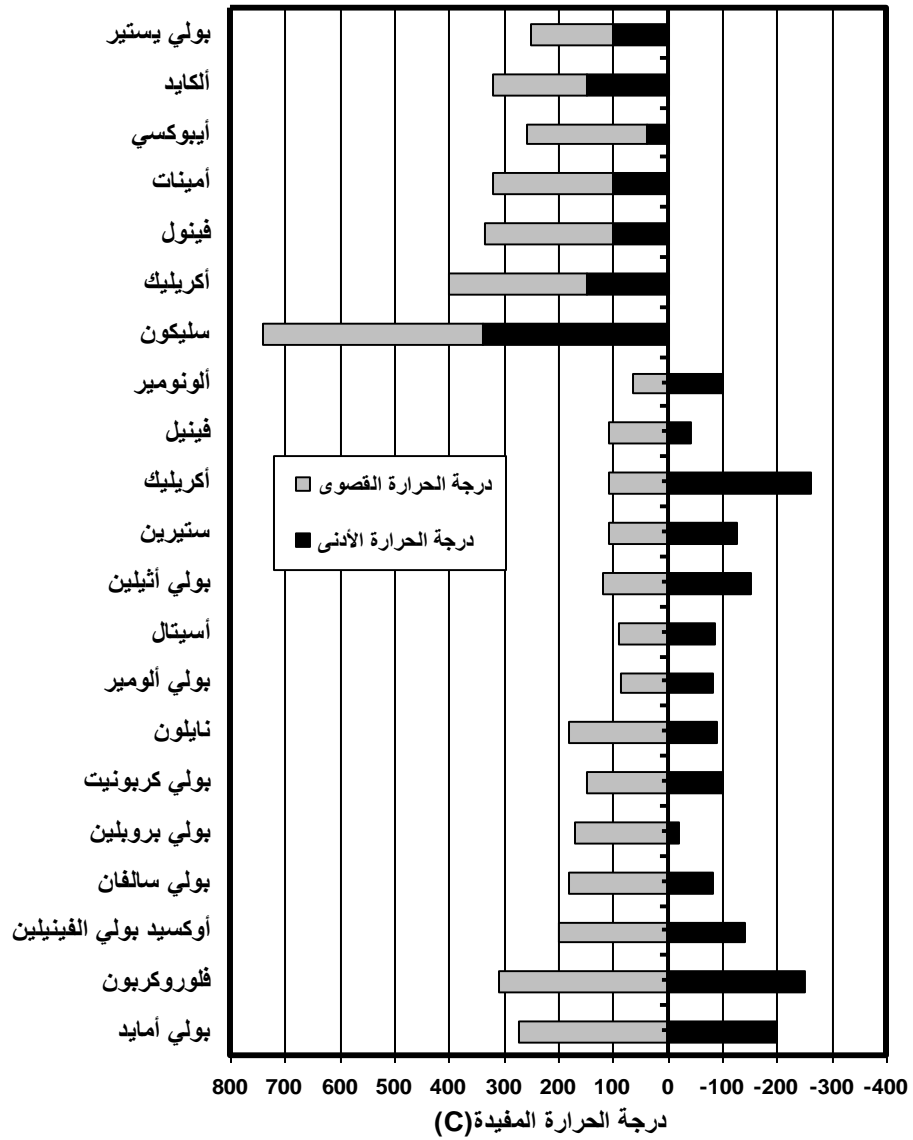
4-2-5 الزحف (Creep)

تحت تأثير الحمل الثابت والمستمر، لا يمكن التنبأ بالتشوه الدائم الذي ستتعرض له اللدائن عند إجراء حسابات مقاومة التصميم للأحمال. تحصل البوليمرات على المقاومة من خلال الروابط بين سلاسل جزيئاتها الطويلة و عندما يكون الحمل مستمراً، تنزلق الجزيئات بشكل ابتدائي، ثم يعقبها حصول تشوه دائم بعد ذلك. تحدث هذه الظاهرة في جميع أنواع اللدائن، لكنها بدرجة كبيرة في البوليمرات الغير المدعّمة (الغير المقوّاة). إذا كان الانحراف الحاصل للمكونات



شكل (5-6) خصائص الزحف للبولي أثير.

الإنشائية مع مرور الوقت سوف يؤثر على خدمة المكوّن، فإنها يجب ان تُصمم استناداً إلى مقاومة الزحف أفضل مما ان تصمم على أساس مقاومة الخضوع. ان الشكل (5-6) يمثّل منحني الزحف في البوليمرات الكلورة (Chlorinated Polymers). فإذا كان إجهاد التصميم (3.4 MPa) عند درجة حرارة (66 °C)، فان هذه المادة ستستطيل (1%) مع مرور الزمن. ان الطريقة الشائعة والتي تستخدم للتغلب على الزحف في البوليمرات هي بوضعها بمتصيدات ميكانيكية مع المعادن حتى لا يكون هنالك مجال للبوليمر بالانسياب. هذا الإجراء غالباً ما تستخدم في وصلات تمدد الجسور. حيث تُدعم نهايات الجسور الغير مسمرة العتبات بواسطة بلاطة من الفلوروكربون (Fluorocarbon-Slabs) توضع في معزل عن أعمدة الإسناد المعدنية.



شكل (7-5) مديات درجات الحرارة المستخدمة لأنواع البوليمرات.

بالرغم من ان خواص اللدائن الميكانيكية والزحف بصورة عامة تضرر بالحرارة إلا ان لكل نوع من أنواع اللدائن هنالك مدى لدرجة حرارية يكون فيها مناسباً للاستخدام. ان درجة حرارة التشوه هي مؤشر على التأثير القصير الأمد للحرارة؛ وأما أفضل مؤشر فهو بيانات الزحف. الشكل (7-5) يبين مقارنة بين مديات درجات الحرارة الاعتيادية المفيدة لأنماط لدائنية هندسية مختلفة.

5-2-5 سرعة تكوين اللهب (Flammability)

ان سرعة تكوين اللهب في البوليمرات يمكن أن تكون مهمة في التصميم إذا كان هنالك أي لهب مباشر قد يكون من المحتمل ان يتلامس مع الجزء المُصمم. ان بوليمرات الترموستك سوف لن تتصهر كبوليمرات الترموبلاستيك، لكنها ستحترق وسيصيبها بعض التقحم بعد إزالة مصدر الحرارة.

يستخدم مصطلح التخميد الذاتي للهب (Self-Extinguishing) ليصف أنواع اللدائن التي لا تمتلك هذه الخصائص. في الوقت الحاضر، بدأ يكون اختبار قابلية سرعة تكوين اللهب يحذرنا لنكون أكثر حذراً عند اختيار المواد.

فبعض أنواع اللدائن لها قابلية على تعزيز الاشتعال (Sustain-Combustion)، و يمكن مقارنة قابلية تكوين اللهب باختبار معدل الاشتعال بحسب طريقة الاختبار القياسية الأمريكية دي 635 (ASTM D635). حيث يتم قياس نمو اللهب في عينة ذات حجم قياسي معين عادةً بالبوصلة بالدقيقة. يمكن إجراء تعديل العديد من البوليمرات التي تمتلك قابلية على تعزيز الاشتعال لتحويلها إلى مواد ذاتية الإخماد للهب، بعمليات كالبلمرة المشتركة أو بالإضافة. مثال على ذلك ان اشتراك ستيرين أكريلونيتريل (Styrene Acrylonitrile) أو يختصر ب(أس أي أن) (SAN) مع البولي ستيرين سيُخفض من قابليته على تكوين اللهب.

في تصاميم التطبيقات التي يتطلب فيها ان تكون خصائص الانصهار أو قابلية سرعة تكوين اللهب مهمة، كالحزانات والحاويات المستعملة في خزن السوائل القابلة للاشتعال، فإن معظم أنظمة الأمان في هذه البلدان سوف لن تسمح باستخدام اللدائن في مثل هذه التطبيقات. لأنها وفي حالة نشوب الحرائق فان هذه الحاويات ستتصهر أو ستحترق، فتسكب محتوياتها وتزيد من أخطار الحريق.

لا تمتلك اللدائن مقاومة للحريق كما تمتلكها المعادن وهذا المعامل يجب أخذه بنظر الاعتبار عند التصميم.

6-2-5 متانة التلم (Notched Toughness)

في الجداول التي أشرنا إليها في الفصل الرابع، نستطيع ان نرى بأن مقاومة الصدم مع وجود التلم للعديد من البوليمرات الهندسية الشائعة هي أقل من (5.41 J/cm)، وفي الحقيقة ان قيم العديد منها بحدود (0.541 J/cm). من الجانب التصميمي، هذا يعني أن اللدائن مادة هشّة، وعلى المصمم ان يأخذ بنظر الاعتبار تأثير الزوايا الحادة، التسننات، و حزوز تركيز الإجهادات الأخرى. فبدون الحزوز أو التلمات فان العديد من البوليمرات لديها مقاومة ممتازة للصدمات. كمثال على ذلك فان نوع من الأسييتال يمتلك مقاومة للصدم (بدون التلم) قد تصل لغاية (54.1

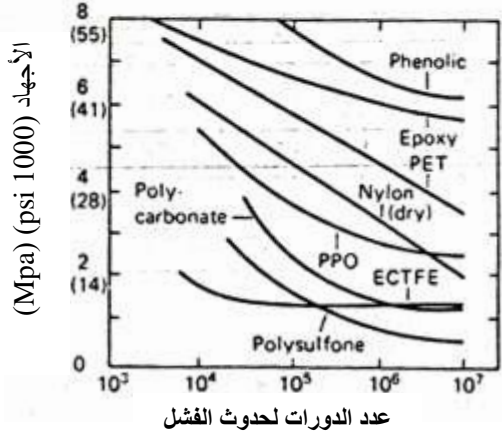
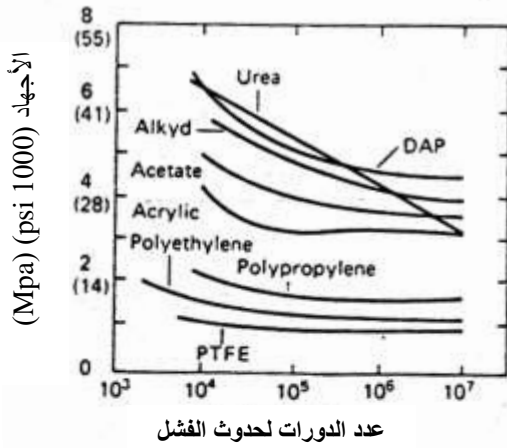
J/cm وبالرغم من ذلك فان مقاومة الصدمات بالثلمة بطريقة أيزود (Izod Test) هي فقط (1.08 J/cm). في أثناء الخدمة في التطبيقات الإنشائية للبوليمرات، يجب أخذ الحيطة على منع أي تحطم قد يحدث نتيجة للخدوش أو حفر في الأجزاء المصممة. الشكل (5-8) يبين مقارنة للمدى الشائع لمقاومة الصدمات لبعض البوليمرات الهندسية.



شكل (5-8) مقارنة لمقاومة الصدمات لأنواع من البوليمرات عند درجة حرارة الغرفة.

النقطة الأخيرة التي نود الإشارة إليها هنا في خواص تحمل الصدمات للبوليمرات هي أن العديد من المواد اللدائنية تحصل على مقاومتها للصدمات نتيجة لإضافة المُلدنات إليها. لكن مع مرور الزمن كما أشرنا سابقاً، ستتطاير تاركةً اللدائن بحالة جداً هشّة. إن فقدان المُلدن في بعض الحالات قد يؤدي إلى حدوث تغييراً في الحجم كذلك. لذلك يوصى باستخدام مواد غير مُلدنة عند تصميم الأجزاء اللدائنية التي ستتحمل الصدمات.

7-2-5 الكلال (Fatigue)



شكل (9-5) خصائص الكلال عند درجة حرارة الغرفة لبعض البوليمرات.

إذا أستخدمنا المعادن في الأجزاء المعرضة إلى الأحمال الدورية فإنه من المناسب ان نستخدم إجهاد الكلال كإجهاد للتصميم. يجب ان نتبع نفس الأجراء للأجزاء اللدائنية التي قد تتعرض للأحمال الدورية. بالرغم من ذلك إلا ان بيانات الكلال لللدائن ستكون صعبة المنال، الشكل (9-5) يبين بعض هذه البيانات.

إذا كانت بيانات الكلال غير متوفرة في البعض من المعادن، فإننا نستطيع استخدام القانون العام الذي يعتبر ان إجهاد الكلال هو (50%) من إجهاد الشد. لا يوجد تناسب مماثل مسموح به في ذلك في اللدائن، بالإضافة إلى شحة بيانات الكلال لللدائن بسبب عدم وجود منطقة السلوك المرن بصورة تامة (هنالك انفعال لدن حتى عند الإجهادات التي هي ما دون إجهاد الخضوع)، حيث يحدث هنالك بعض الانفعال الدائم أثناء التحميل الدوري. هذا الانفعال وخاصة عند عكس الإجهاد التام (شد وانضغاط)،

ممكن ان ينتج عنه تخلف (Hysteresis) والتي ستؤدي إلى تسخين جسم المكون. عند اخذ الكلال بنظر الاعتبار في التصميم، يجب علينا ان نحاول ان نصمم على إجهاد الكلال إذا توفرت بيانات الكلال. وفي حالة عدم توفر هذه البيانات فحينها يجب ان نبقي الجزء المصمم عند أجهاد منخفض بما فيه الكفاية، ومهتمين بتأثير التخلف (حلقة الهستيرة) والبيئة، وفوق كل شيء إزالة حزوز وزوايا تركيز الإجهادات.

8-2-5 تباين الخواص باختلاف المحاور (Anisotropy)

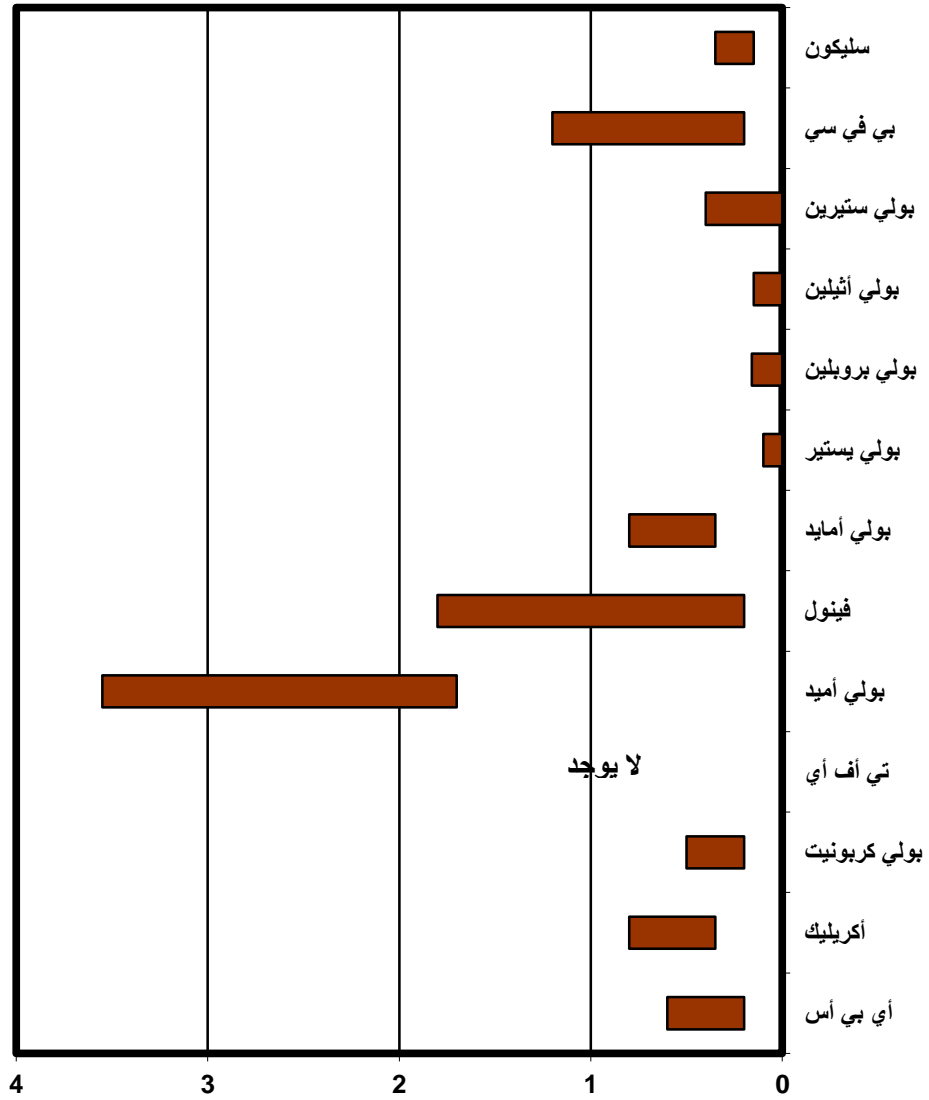
تتغير خواص العديد من البوليمرات المقواة بتغير اتجاه الحمل المسلط عليها. هذه هي الحالة التي يطلق عليها تباين الخواص باختلاف المحاور (أنايذوتروبي). ان مقاومة الفيول المقوى بالألياف هي أكثر بكثير في اتجاه النسيج مما عن مقاومته المقاسة على حافته (Edgewise). من الجانب التصميمي، فان هذه لا تشكل عادةً مشكلة رئيسية، حيث ان الجزء غالباً ما يصمم

ليمنع تحميله عند الحواف. يمكن ان يحدث تباين الخواص كذلك في البوليمرات الغير المقواة. لكنه لا يسبب مشاكل عادة فمثلاً عند وضع قرص للثقب خارج صفيحة ميثوقة؛ فان كلا القرص والثقب سوف لن يكونا مستديرين بعد الثقب بسبب، ان التبريد سيكون غير متجانس من درجة حرارة البثق إلى درجة حرارة الغرفة. ان التبريد الغير متجانس سيؤدي إلى حدوث إجهادات متخلفة (Residual Stresses) و عندما يتم تحرير هذه الإجهادات المتخلفة أثناء عمليات التشغيل، سيحدث التشوه. هذه الحالة نستطيع التغلب عليها بالمعالجات الحرارية وهي تشبه عملية تحرير الإجهادات في المعادن.

باختصار، هنالك العديد من المواد اللدائنية تمتلك خواصاً تتغير بتغير اتجاه الحمل المسلط. أن أفضل طريقة للتعامل مع هذه الحالات هي جعل المحور الطويل للجزء اللدائني عند التصميم، هو محور الإجهادات الرئيسية (Principle Stresses) للجزء، ويمكن تقليل الإجهادات الداخلية بعملية تحرير الإجهادات المتخلفة.

9-2-5 إمتصاص الرطوبة (Moisture Absorption)

ان أحد أغلب عيوب اللدائن هو ميلها لإمتصاص الرطوبة من الهواء المحيط وتغير حجمها نتيجة لذلك. فهناك العديد من تطبيقات اللدائن التي يُتطلب فيها الدقة العالية للأبعاد (كالتروس والحدبات والمحامل). ان تغير الحجم قد يحول دون استخدامنا للبوليمر في صناعة الأجزاء وحتى التي يمتلك فيها خواصاً تتفوق على المعادن. وبما أن امتصاص الرطوبة في جميع البوليمرات قد يحدث بدرجاتٍ متفاوتة فقد يكون كبيراً أو صغيراً، فان الطريق إلى إحباط مشكلة هذا العامل ستكون بالاختيار المناسب لمواد تمتلك معدلاً واطناً للامتصاص، ومن ثم حساب تأثير تغير الحجم على الأبعاد الحرجة. الشكل (5-10) يوضح مديات امتصاص الرطوبة النمطي للبوليمرات الهندسية.



الماء الممتص خلال 24 ساعة، الزيادة في الوزن %.

شكل (10-5) مقارنة لمديات أمتصاص الرطوبة لبعض أنواع البوليمرات.

أسئلة الفصل

1. ما هي الفائدة التي تتميز بها البوليمرات التالية والتي تستخدم في الحمل المنخفض:
 - أ. أي بي أس (ABS)
 - ب. ستيرين (عالي الصدم)
 - ج. بولي أثيلين
 - د. الأكريليك
2. ما هي المفاهيم التي يجب الاهتمام بها عند تصميم الأجزاء اللدائنية المعرضة للأحمال؟
3. لا يمكننا إهمال معامل التمدد الحراري للبوليمرات عند التصميم، لماذا؟
4. ناقش تأثير الزحف على التطبيقات العملية للبوليمرات وكيف يمكن التغلب على هذه الظاهرة؟
5. بالرغم من أن صلابة البوليمرات هي أقل بكثير من صلابة المعادن إلا أنها لا تشكل مشكله في استخدامه في التطبيقات الهندسية، بين كيف يحصل ذلك؟ ولماذا؟
6. ما هو تأثير الحزوز والشقوق والثلثات على خواص البوليمرات؟ وكيف نستطيع ان نُحسن من مقاومتها لهم؟
7. علل ما يأتي:
 - أ. هنالك شحة في بيانات الكلال لللدائن.
 - ب. تعتبر خاصية امتصاص الرطوبة من الخواص المهمة التي يجب الاهتمام بها عند تصميم المكونات اللدائنية.
 - ج. البوليمرات لا تخضع لقانون هوك.

الفصل السادس:

التطبيقات الميكانيكية للبوليمرات

Mechanical Application of
Polymers

1-6 الخواص الميكانيكية (Mechanical Properties)

تمتلك البوليمرات الهندسية بصورة عامة، إجهاد شد أقصى ومقاومة إنضغاط، أقل بكثير عما في المعادن، خاصة عند المقارنة بصلب العدة (Tool Steel) والصلب ذي المقاومة العالية (High Strength Steel)؛ لكنها عندما تُقارن بمعادن كالألومنيوم و الزنك والنحاس و المغنيسيوم، فإن الفارق سيصبح أقل. الشكل (1-6) يبين مقارنة لمديّات المقاومة لأنواع اللدائن الشائعة.

ان إجهاد الشد في الصلب قد تصل إلى (689 MPa)، لكن إذا قسمنا هذا الإجهاد على الكثافة وقارناه كنسبة إجهاد إلى الكثافة، فإننا سنجد ان البولي يستير المُقَوَّى والأبيوكسي يمتلكا قيماً تتفوق على المعادن.

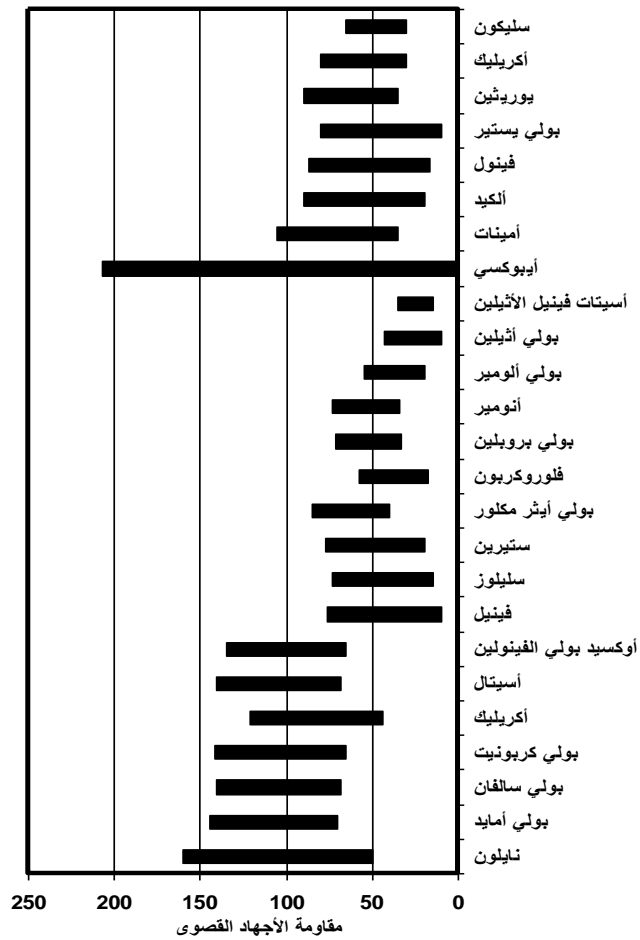
ان صلادة اللدائن هي إحدى الخواص الميكانيكية التي يصعب مقارنتها بالمعادن، لكننا نستطيع القول بأن أكثر أنواع الصلب ليونةً سيكون أكثر صلادة من أصلد أنواع اللدائن. هذه العبارة لا نستطيع ان نحددها بكمية حيث انه لا يوجد اختبار صلادة مقبول يمكن ان يستعمل لكلا اللدائن والمعدن، لكننا نستطيع مقارنة الجودة كما مبين في الشكل (2-6). وربما نستطيع ان نستعرض الدلائل على ذلك بقياس مقاومة الخدش (Scratch Resistance). وبالرغم من طراوة اللدائن بالمقارنة مع المعادن، إلا إنها تتصرف في تطبيقات كثيرة بصورة جداً مقنعة في مقاومة الخدوش والتآكل (Abrasion Resistance).

يستخدم الثرموستك الطبقي (الميلامين والفينول) في صناعة الطاوات وأغلفة السطوح المكتبية، حيث أنها تقاوم الأشكال العديدة لقسوة الاستعمال. النقطة التي نود الإشارة إليها هنا هي انه بالرغم من ان اللدائن لا تمتلك قوة وصلادة المعادن، إلا ان خواصها الأخرى كالوزن النوعي المنخفض، الكلفة، و قابليتي التشكيل والتشغيل عندما تؤخذ بنظر الاعتبار ربما ستجعلها الاختيار الأفضل.

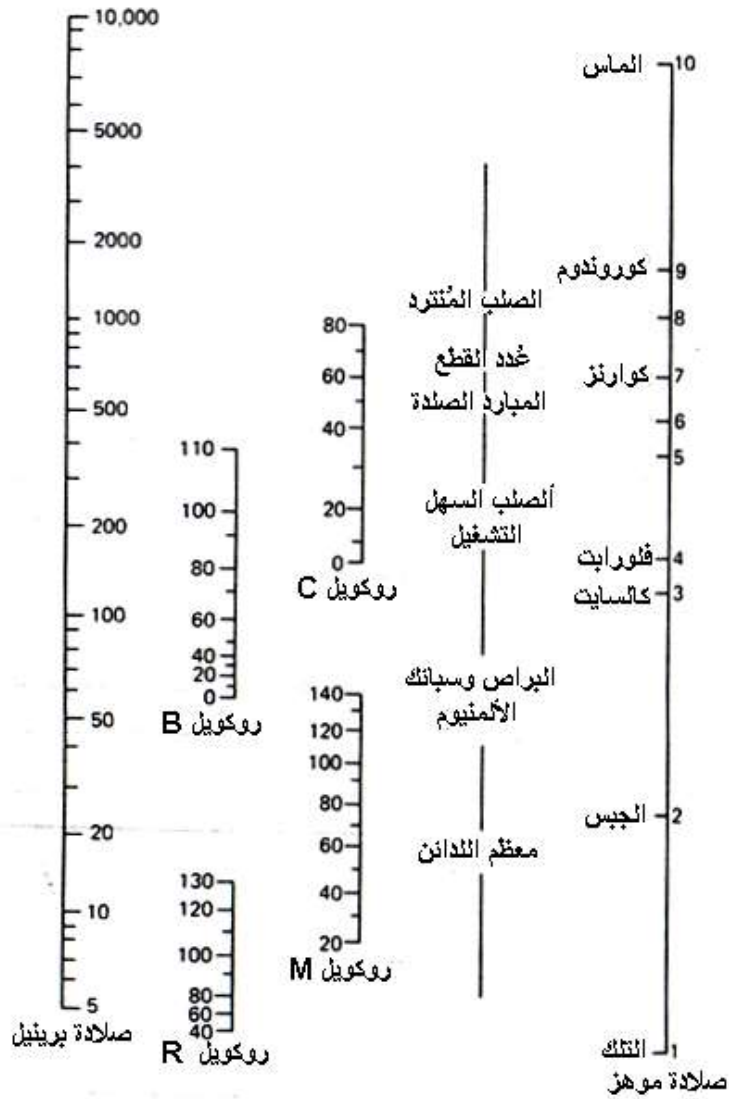
فمن الممكن التعامل بسهولة مع انخفاض المقاومة بإجراء حسابات التصميم على أقسام الجزء كلٍ على حدة.

والخلاصة نستطيع القول بان اللدائن تمتلك مجموعة متغيرات، مثل التأثر بالبيئة وخصائص المقاومة، التي تتطلب اهتماماً عند التصميم الهندسي للأجزاء. يجب تحديد هذه العوامل و فوائدها؛ فإذا لم تؤخذ بنظر الاعتبار، فإن الجزء سيفشل بصورة مبكرة، وسيلقى اللوم على صنف المادة اللدائنية في سبب الفشل. ان الاستعمال الناجح لللدائن في التصميم يكمن في التنبأ باستخدام التقييم الفكري لتأثير معاملات الخواص على وظيفة المكوّن في التصميم. فعلى المصمم أن يسأل أسئلة مثل، هل سيؤثر امتصاص الرطوبة على وظيفة هذا الجزء؟ هل نستطيع إزالة الانحناء عن هذه القلوطة؟ ما هي مقاومة هذا النوع من اللدائن عند درجة حرارة (49 °C)؟ هل يجب ان يكون هذا الجزء غير قابل لتكوين اللهب؟

ان الاختبار الذاتي مع مثل هذه الأسئلة سيضمن نجاح اللدائن عند استخدامها في المكونات الإنشائية. ان بعض الأمثلة الشائعة على التطبيقات الإنشائية لللدائن مبينة في الشكلين (6-3 و6-4).



شكل (1-6) مديات مقاومة الشد لأنواع البوليمرات.



شكل (2-6) مقارنة تقريبية بين مقاييس الصلادة.



شكل (3-6) تروس مصنوعة من الأستيتال.



شكل (4-6) مضخة لسوائل آكالة تستخدم محامل بوليمرية.

2-6 استخدام البوليمرات في تطبيقات الاحتكاك والبلي (Polymers For Friction & Wear)

تستخدم البوليمرات بشكل واسع في صناعة المكونات الأنزلاقية و ربما تكون الخصائص الاحتكاكية للبوليمرات هي الأكثر أهمية في أسهم التصميم الهندسية. تمتلك العديد من البوليمرات خصائص احتكاكية أقل من أي مادة أخرى عند احتكاكها بالمعادن. ويعود السبب في ذلك إلى العملية الكيميائية في صنع هذه البوليمرات. وبما ان الاحتكاك هو نتيجة لميل تكوين الارتباط بين الأسطح المتلامسة، فانه كلما يزداد الاختلاف في البنيان الهيكلي بين السطوح المحتكة، كلما يقل الميل لتكوين هذه الروابط بينها. تتألف البوليمرات من سلاسل جزئية طويلة وبصورة رئيسية تتألف من ذرات الهيدروجين والكربون. هنالك ميول قليلة لجزئيات البوليمر بالارتباط بترتيب منتظم وكثيف كما يحدث ذلك لذرات المعادن.

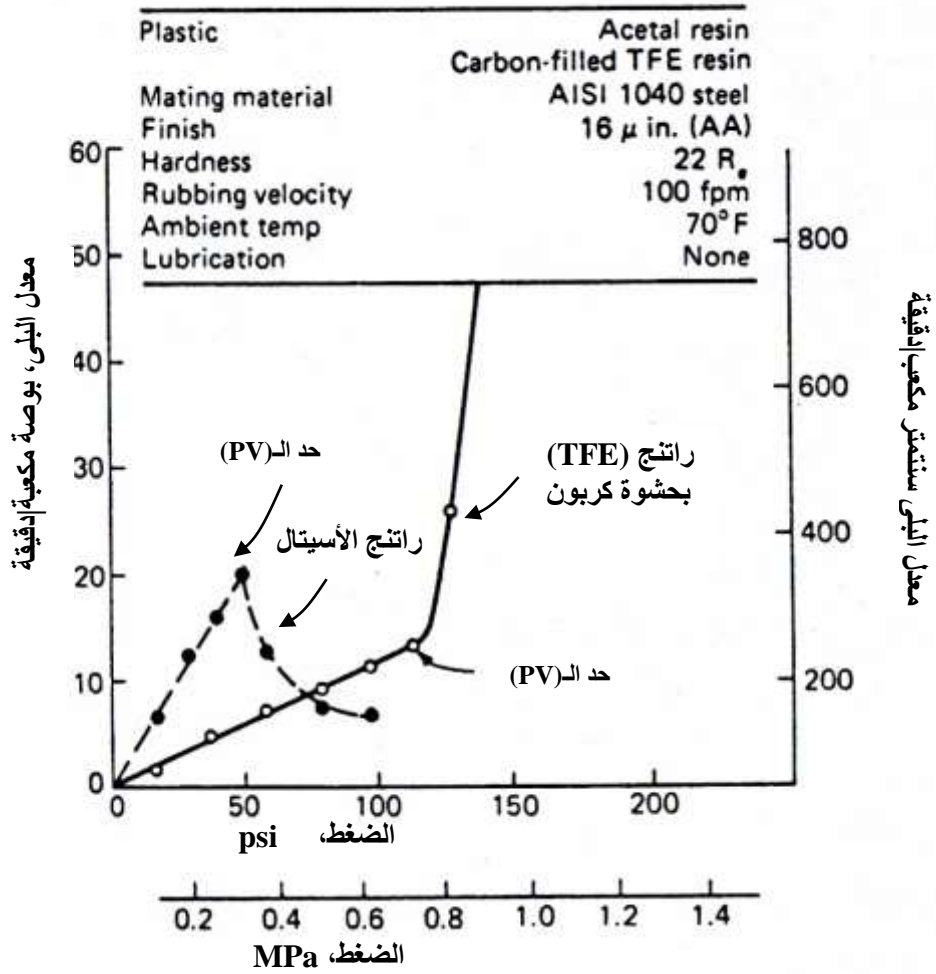
ان البلي الذي يطبق على الأنظمة البوليمرية هو غالباً ما يأخذ شكل البلي الالتصاقي (Adhesive Wear) أو البلي الاحتكاكي (Abrasion Wear). يحدث البلي الالتصاقي عندما تكون هنالك قطعة صلدة كالمبرد أو دقائق حادة و صلدة كالرمل ملامسة لسطوح أكثر ليونة. حيث ينشأ البلي الالتصاقي نتيجة لميل السطوح إلى الترابط، أما البلي الاحتكاكي فيحدث نتيجة لتشوه وقص شظايا السطوح المحتكة. تتغير خواص البلي الالتصاقي للبوليمرات تغيراً كبيراً مع احتمالية تغير التوافق بين البوليمرات المحتكة.

تعتبر مقاومة البلي الاحتكاكي للبوليمرات دالة كبيرة للرجوعية (Resilience). فعلى سبيل المثال، الإلاستومير، بسبب رجوعيته (مرونته)، من المحتمل كثيراً ان يتشوه تحت تأثير التماس مع السطوح الصلدة والحادة أكثر من احتمالية ان يحدث فيه القص. هل حاولت ان تبرّد قطعة من المطاط؟

في بقية هذا الجزء، سوف نناقش كيفية قياس البلى والاحتكاك في البوليمرات وكيف تُنسب هذه القراءات إلى مقاومة البلى للبوليمرات في المحامل المستوية والأنظمة الإنزلاقية الأخرى.

3-6 قياس البلى (بي في) (PV Measurement)

تصنف العديد من المحامل اللدائنية بموجب المصطلح (بي في) (PV). رياضياً، البلى (PV) هو ببساطة ضغط التماس الظاهري (Apparent Contact Pressure) مقاساً بالميجا باسكال مضروباً بسرعة الانزلاق (Sliding Velocity) والمقاسة بالمتر بالثانية. هنالك مواصفات يمكن قراءتها، " استخدم هذه المحامل لـ (PV) من 5,000 إلى 15,000 ". هذا يعني انه عندما تكون ظروف التشغيل للـ (PV) في هذا المدى، فان المحامل ستعطي عمراً مقنعاً للخدمة. ان إحدى الطرائق الشائعة الاستخدام لإيجاد قيمة البلى (PV) هي بصنع عينات للمادة آخذين بنظر الاعتبار اختيار الشكل الملائم والذي سيجهزنا بما يُعرف بالمساحة السطحية الظاهرية (Apparent Surface Area)، ومن ثم تشغيلهم لفترة زمنية معينة وعند سرعة ثابتة مع زيادة مقدار ضغط التماس. حيث يقاس البلى هنا بعد كل عملية اختبار لضغط معين، والتمثيل البياني للقراءات سوف يمثل شكل البلى مبيناً أين ستحدث التغييرات الكبيرة في سلوك البلى. ويطلق على هذه التقنية لقياس البلى (PV) بطريقة الضغط المُتدرج (Pressure Stepping Method). ان الضغط المحدد في هذا الاختبار ليس بالضرورة بان يُحدث أكبر بلى، ففي الحقيقة ان هذه الاختبارات غالباً ما تصمم لتقلل البلى. ان نمط الفشل عند البلى (PV) المحدد ربما سيحدث نتيجة لحدوث انصهار موقعي أو درجة حرارية عالية غير اعتيادية و تآكل في المحامل. ان العيب الرئيسي لهذا النوع من الاختبارات هو إنها تُجرى لفترة قصيرة الأمد (عدد الدورات قليلة) ولذلك فهي لا تعتبر مؤشراً على ظروف التشغيل.



شكل (5-6) طريقة إيجاد الـ (PV).

التقنية الأخرى التي تطبق لقياس الـ (PV) هي بقياس البلى لعينات اختبار عند مجموعة من الضغوط وفي سرعات مختلفة. حيث تمثل البيانات برسم العلاقة بين معدل البلى و الضغط المسلط، والنقطة التي يحدث عندها الانعطاف في منحنى البلى تدعى بحد الـ (PV)، نتائج هذا الاختبار مبينة في الشكل (5-6).

بالإضافة إلى استخدام المؤشر (PV) لمعرفة خواص المحامل اللدائنية، كذلك يتم استخدام معامل البلى في بعض الأحيان وهو يطبق كثيراً، لمعرفة فيما إذا كانت هذه المحامل ستشتغل في المدى المفيد لنظام الـ (PV) وذلك عن طريق اختبار (PV).

حيث ان معامل البلى هو ميل منحنى البلى المستقر ضد الوقت لاختبار معين. من الواضح ان معدل البلى سيعتمد على الهيئة العامة للعينة؛ لذلك فمن الضروري ان يتضمن هذا المعامل معلومات عن الحمل والسرعة، لذلك تشتق وحداته من المعادلة التالية:

$$K (\text{WearFactor}) = \left(\frac{\text{in.}^3 \text{ min}}{\text{ft lbhr}} \right) = \left(\frac{\text{cm}^3 .s}{\text{kg m.s}} \right) \dots\dots(1.6)$$

حيث ان:

K : هو معامل البلى.

يمكن اشتقاق معادلة البلى من علاقة البلى الأساسية التي تنص على ان البلى يتناسب مع الحمل المسلط والمسافة الكلية للانزلاق:

$$W = K.L.V.t \dots\dots\dots(2.6)$$

حيث ان:

W : حجم البلى مقاس بالبوصة المكعبة (in.^3) أو السنتمتر المكعب (cm^3).

L : حمل المحمل، مقاساً بالبرطل (lb) أو الكيلوغرام (kg).

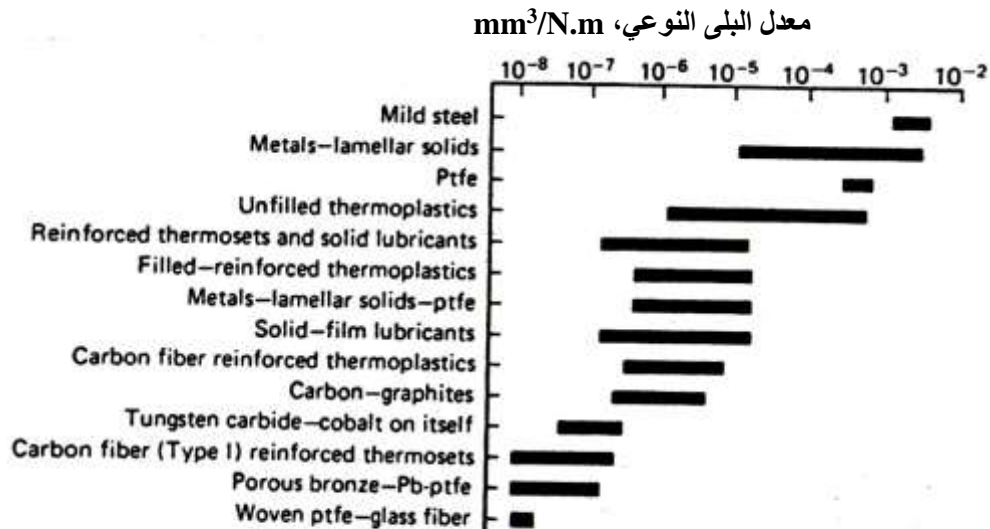
V : سرعة الانزلاق، قدم بالدقيقة (fpm) أو (m/s).

t : زمن الاختبار، مما عدا ان لا نستخدم الوحدات العالمية (SI Units) في حساب الـ(PV) أو معامل البلى، لكن التحويل ممكناً ان اردنا ذلك.

وبإعادة ترتيب المعادلة لايجاد قيمة (K) نحصل على:

$$K = \frac{W}{L.V.t} = \frac{\text{in}^3 .\text{min}}{\text{lb ft.hr}} \left(\frac{\text{cm}^3 .s}{\text{kg m.s}} \right) \dots\dots\dots(3.6)$$

فكلما ازداد معامل البلى كلما كانت مادة المحمل سيئة في مقاومتها للبلى. الجدول (3-5) يوضح بعض معاملات البلى النمطية لمواد المحامل البوليمرية.



شكل (6-6) بلى اللدائن والمعادن ضد الصلب المتوسط الكربون عند درجة حرارة الغرفة.

يجب استخدام (PV) ومعامل البلى مع التنكير بأنه لا يوجد اختبار صناعي مقبول - قياسي لإيجاد هذه المتغيرات للمحامل. أنهما محاولتين لتسهيل عملية اختيار اللدائن لهذا الـ (PV)، في التطبيقات. في الأجزاء الحرجة ربما سيتطلب قبول معامل البلى و (PV) ، تفحصاً دقيقاً. والخاصة، فان قابلية خدمة المحامل المصنعة من المواد اللدائنية يمكن التنبأ بها عن طريق قياس قيم الـ (PV) لعينات قياسية في مختبرات عديدة. لا يوجد هناك بديل عن اختبار الخدمة الحقيقي، لكنها مع ذلك يمكن ان تستخدم كمساعدات للتصميم. تتفوق خواص البلى الغير مُزلق للعديد من أنواع اللدائن، إذا ما شُغلت ضمن مدى الـ (PV)، على اغلب أنظمة المعدن - معدن الغير مُزلق،

جدول (1-6) خواص مواد الحامل البوليمرية.

PERFORMANCE CHARACTERISTIC OR PROPERTY	UNMODIFIED POLYMERS				MODIFIED POLYMERS				
	NYLON	ACETAL	FLUORO-CARBON	POLYIMIDE	PHENOLIC	NYLON-GRAPHITE FILLED	ACETAL-TFE FILLED	FLUORO-CARBON-WIDE RANGE OF FILLERS	POLYIMIDE-PHENOLIC-TFE FILLED
Maximum load, projected area (zero speed), psi*	4900	5200	1000	10,000	4000	1000	1800	2000	4000
Speed, continuous operation (5 lb load), max (rpm) PV for continuous service, 0.005 in. wear in 1000 hr	200-400	500	100	1000	1000	200-400	800	1000	1000
Limiting PV at 100 fpm	1000	1000	200	300	100	1000	2500	2500	5000
Coefficient of friction	0.20-0.40	0.15-0.30	0.04-0.13	0.1-0.3	0.90-1.1	0.1-0.25	0.05-0.15	0.04-0.25	0.1-0.3
Wear factor, $K \times 10^{-10}$ in. ³ min/ft.-lb.-hr ³	50	50	2500	150	2000	250	20	1-20	15
Elastic modulus, bending, psi $\times 10^4$ **	0.3	0.4	0.08	0.45	5	0.4	0.4	0.4	0.63
Critical temperature at bearing surface, °F	400	300	500	600	300-400	400	300	500	300-400
Resistance to: Humidity	204	149	260	316	149-209	204	149	260	149-209
Chemicals	Fair	Good	Excellent	Good	Good	Fair	Good	Excellent	Good
Density, g/cm ³	1.2	1.43	2.15-2.20	1.42	1.4	1.2	1.54	2.15-2.25	1.49
Cost index for base material	1.4	1	5	15	—	1.5	6	5	15

From R. P. Stejtin, "Friction and Wear of Plastics," Mirash Engineering Quarterly, ASM, May 1967.
 *Multiply by 6.89×10^{-3} to convert to MPa.
 **Multiply by 0.3048 to convert to m/min.
 †Exceeds limiting PV.

وهذه موضحة في الشكل (6-6). الجدول (1-6) يبين خواص مواد المحامل البوليمرية.

4-6 الخصائص الاحتكاكية Frictional Characteristics

التعريف الكلاسيكي للاحتكاك هو انه القوة المقاومة لحركة جسم على سطح آخر عندما يتحرك أو يحاول الحركة. رياضياً، تساوي قوة الاحتكاك معامل الاحتكاك مضروباً في القوة العمودية على سطح الاحتكاك.

$$F = \mu N \dots\dots\dots(4.6)$$

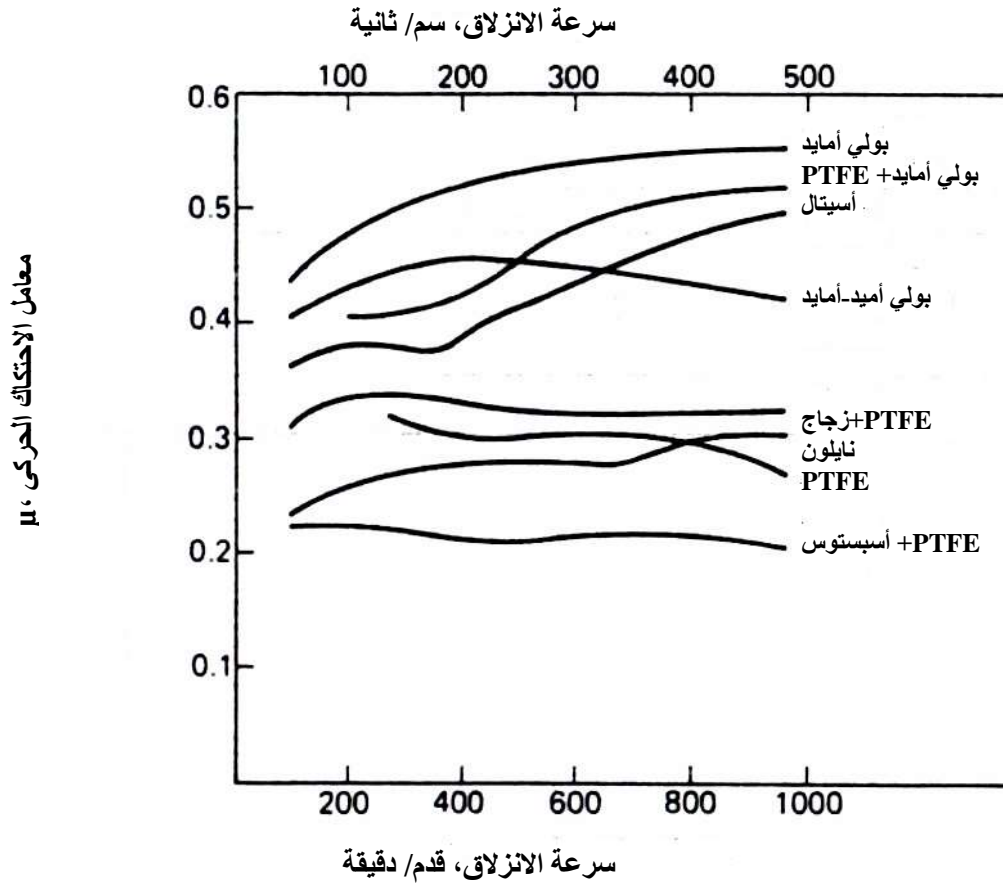
حيث أن:

F: قوة الاحتكاك مقاسة بالنيوتن (N)

μ : معامل الاحتكاك (بدون وحدات)

N: القوة العمودية على سطح الاحتكاك مقاسة بالنيوتن (N)

من خصائص هذه المعادلة هي أن قوة الاحتكاك لا تعتمد على المساحة. بصورة عامة هذه الظاهرة صحيحة لسطوح المعادن المحكمة الانطباق، وهي ان يكون معامل الاحتكاك غير معتمداً على المساحة. بالإضافة إلى ذلك فهو لا يعتمد على السرعة ودرجة الحرارة لغاية (200°C). في المواد اللدائنية، هذه القوانين القديمة قد تغيرت، حيث ان الانزلاق التلامسي يشمل الحرارة أيضاً للسطوح المحكمة الانطباق. وبما أن خواص المواد اللدائنية تكون جداً حساسة للحرارة، فانه من الواضح سيكون هنالك تأثيراً لمقدار الحمل والسرعة على خصائص البلى والاحتكاك لهذه المواد، وهذا ما يحدث تماماً. تكون خصائص الاحتكاك في البوليمرات معتمدةً على ضغط التماس، السرعة، درجة الحرارة، التشطيب (النهاية السطحية) للمواد المحتكة. الشكل (6-7) يبين تأثير سرعات الانزلاق على معامل الاحتكاك لبعض البوليمرات الشائعة. وبما ان معامل الاحتكاك يعتمد بصورة كبيرة على ظروف التشغيل، فما الذي نستطيع عمله للتنبؤ بالخصائص الاحتكاكية؟ لسوء الحظ، فان المصدر الموثوق به الوحيد لهذه المعلومة هو الاختبار الذي يتم التوصل إليه تحت ظروف خاصة تؤخذ بنظر الاعتبار. بصورة عامة فان غالبية السوائل لديها تأثيراً تزيقياً على اللدائن وتقلل من مقاومة الاحتكاك في النظام. الحشوات المزلقة التي تضاف للبوليمرات، ككبريتيد الموليبدنيوم، الجرافيت و PTFE، تمتلك تأثيراً مشابهاً لذلك. في بعض الحالات يكون معامل الاحتكاك بين لدائن ولدائن أقل مما بين اللدائن والمعدن. الخلاصة، لمعرفة الخصائص الاحتكاكية للبوليمرات فليس من الضروري ان تقيس مقاومة البلى فيها. ان الاحتكاك في البوليمرات يعتمد بصورة كبيرة على الحمل، السرعة، البيئة المحيطة، والأسطح المحتكة، ومن الممكن ان نحصل على البيانات الدقيقة للاحتكاك لغرض إجراء حسابات التصميم من خلال الاختبار تحت ظروف طبيعية للخدمة.



شكل (6-7) الخصائص الاحتكاكية لبوليمرات مختلفة السرعات الانزلاقية، ضد مادة 1020 صلب، والقوة العمودية 50 غرام.

5-6 استخدام البوليمرات في صناعة المحامل البسيطة

(Polymers For Plain Bearing)

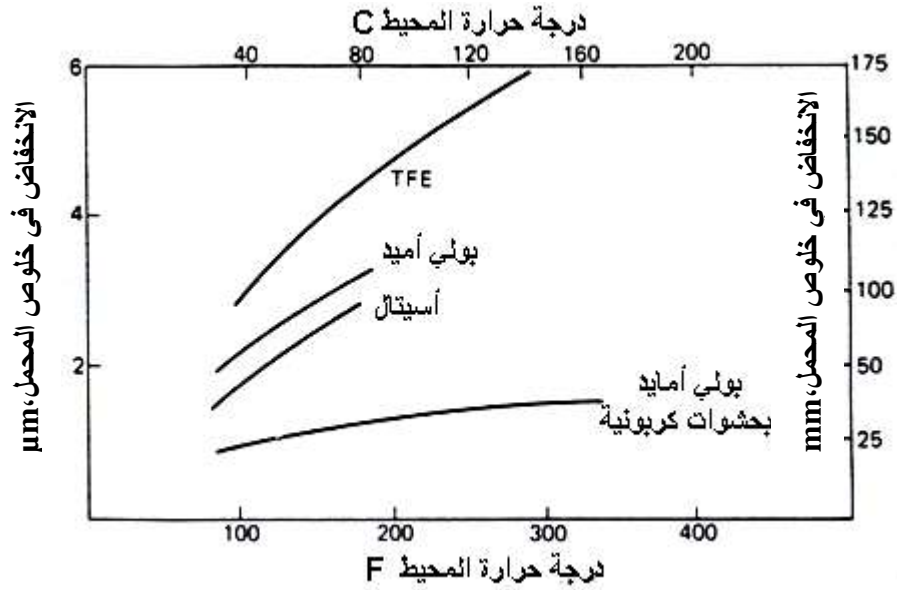
إن قيمة الـ (PV) التي ناقشناها سابقاً هي غالباً ما تستخدم كدرجة لتصنيف البوليمرات المستخدمة في تطبيقات المحامل البسيطة. إن تعريف مصطلح المحامل البسيطة هو ببساطة عبارة عن أسطوانة توضع في مبيت ثابت مع عمود يدور داخل هذه الاسطوانة. هنالك وصف مصطلح شائع آخر يطبق على المحامل البسيطة وهو الجلبة (Bushing). عند تطبيق قيمة (PV) على المحامل البسيطة، فإن السرعة السطحية للمحور يتم حسابها عن طريق (القطر × $2/\pi \times \text{rpm}$) وتضرب بضغط التماس الظاهري. حيث يمثل ضغط التماس والذي يقاس بالميغا باسكال بالقوة العمودية على العمود مقسومة على المساحة الداخلية المُسقطَة للمحمل (Projected Internal Area) وتساوي (القطر الداخلي للمحمل × طول المحمل).

وبما أن جميع المحامل البسيطة هي مصممة بحيث يكون هنالك خلوص بين القطر الخارجي للعمود والقطر الداخلي للمحمل، فلقد فُرض على أن أقل من نصف مساحة المحمل الداخلية هي

التي ستحمل الحمل. إن العديد من البوليمرات التي ناقشناها سابقاً هي مناسبة للاستعمال في المحامل البسيطة، لكن في جميع التطبيقات للمواد الهندسية كمحامل بسيطة تولى الأهمية العظمى الى مسألة تصميم أفضل خلوص للمادة.

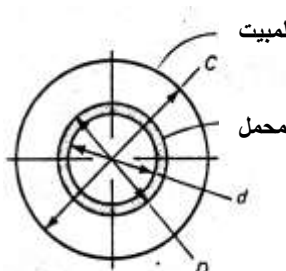
ان أحد أنواع المحامل البسيطة الشائعة الاستعمال هو البرونز المسامي المشرب بالزيت (Oil-Impregnated Porous Bronze). ان هذه المواد تمتلك (PV) قد يصل إلى (100,000)، لكن اللدائن حلت محل هذه المواد بسرعة في العديد من التطبيقات نظراً لكلفتها المنخفضة أو بسبب إن المحامل اللدائنية لا تحتاج إلى تزليق خارجي. وتكون المحامل البرونزية بسيطة في الاستعمال، حيث أن الخلوص للمحور نادراً ما يتغير عن (25 – 50 µm)، وسمك جدرانها هو غالباً (20%) من قطر المحور. يستخدم التوافق الأنضغاطي (Press Fit) في تثبيت العديد من المحامل اللدائنية وغالباً ما يكون الخلوص فيها ما بين (50 – 75 µm). غالباً ما يحول انخفاض الخواص الميكانيكية وارتفاع معدل التمدد الحراري لللدائن إلى عدم استخدامها لهذه الأبعاد بدقة. فمعامل التمدد الحراري لللدائن هو (10)

مرات أكثر مما في المعادن، لذلك عندما يتعرض المحمل إلى حرارة التشغيل، فإنه سوف يتمدد بمعدل أكبر من تمدد المبيت المعدني (Housing). في هذه الحالة سوف لن يسمح له المبيت المعدني بالتمدد الشعاعي (Radial Expansion)، لذلك فإن لجميع الأغراض العملية سيؤدي التغير الحجمي بالحرارة إلى تقليل الخلوص الشعاعي. كمثال على ذلك، لو كان القطر الخارجي لمحمل بلاستيكي (1 بوصة) وسمك المحمل (0.1 بوصة) ومعامل التمدد الحراري هو (5×10^{-5} in/in.°F) أو (9×10^{-5} cm/cm.°C) وسخن إلى درجة حرارة (100°F) أو (55.5 °C) فوق درجة حرارة المحيط. لذا فإن المحمل اللدائني سيسعى إلى أن يتمدد بمقدار (5×10^{-3}) بوصة أو (12.5µm). هذا يعني أن (0.0045) بوصة أو (1.125µm) من التمدد الحاصل في المحمل سيمنع بواسطة المبيت المصنوع من الصلب. من الواضح أن بعض هذا التمدد سيؤخذ في مجرى طولياً (في اتجاه الطول). الشكل (6-8) يوضح تغيرات الخلوص مع تغير درجات الحرارة لمحمل سمك جداره (0.1) بوصة أو (2.54 mm) في مبيت مصنوع من الصلب. يمكن عمل تقريباً للبيانات، لمعرفة تأثير درجة الحرارة على المحامل الأخرى بواسطة التناسب المباشر لسمك الجدار (0.1) بوصة.



شكل (6-8) التغير في الخلوص أثناء تشغيل المحامل اللدائنية لمحمل سمك جدرانها (2.54 mm) موضوعة في مبيت من الصلب.

نلاحظ كذلك بان سمك جدار المحمل هو أيضاً جزء مهماً في تصاميم المحامل اللدائنية كما شاهدنا، بالإضافة إلى التأثير الملحوظ لدرجة الحرارة على خصائص الاحتكاك والتآكل. فكلما كان الجدار اقل سمكاً، كلما كانت إزالة الحرارة أفضل من المحمل وسيقل الانخفاض في الخلوص الشعاعي الناتج عن الحرارة. العامل الأخر الذي يؤثر على أبعاد المحامل هو تقليل الخلوص الناتج عن التوافق الانضغاطي بين المحمل ومبيته. يمكن إيجاد التداخل المناسب لاحتباس المحمل بأفضل طريقة عن طريق حسابات ضغط الإحكام المطلوب باستخدام العلاقة في الشكل (6-9). وإذا كان المبيت كبيراً جداً، فإن أبعاد (C) ستكون في هذه الحالة، قطر أكبر دائرة يمكن رسمها في المبيت مع ثقب المحمل كمركز لها.



المبييت
C
محمل
d
D

$$P = \frac{E\phi(D^2 - d^2)(C^2 - D^2)}{2D^3(C^2 - d^2)}$$

حيث ان:
P: ضغط إحكام المحامل (MPa)
E: معامل المرونة (MPa)
Ø: التداخل (cm)
d: القطر الداخلي للمحمل (cm)
D: القطر الخارجي للمحمل (cm)
C: القطر الخارجي للمبييت (cm)
يتعرض المبييت إلى إجهاد شد هو:

$$\sigma_{t_{max}} = \frac{P(C^2 - D^2)}{C^2 - d^2}$$

حيث ان:
 $\sigma_{t(max)}$: إجهاد الشد الأقصى في المبييت (MPa) (يحدث عند تداخل المحمل).
وتتعرض المحامل إلى إجهادات انضغاطية.

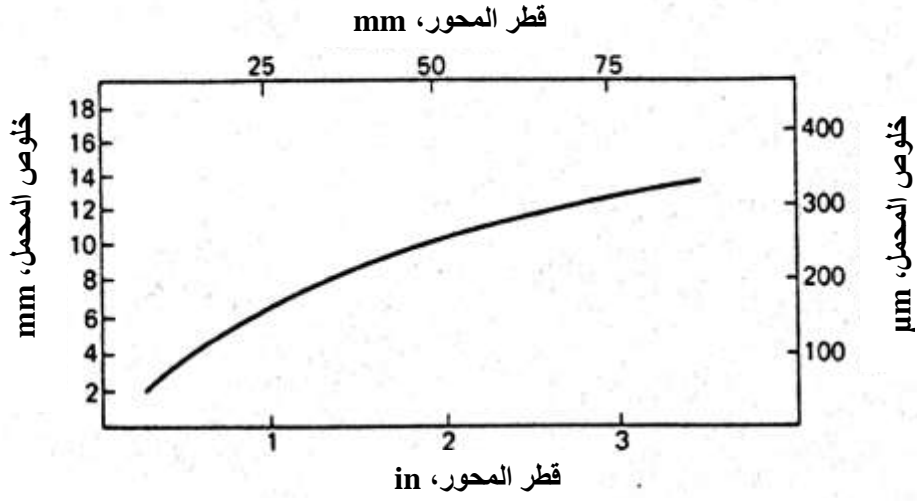
$$\sigma_{C_{max}} = \frac{2PD^2}{D^2 - d^2}$$

حيث أن:
 $\sigma_{C(max)}$: هو إجهاد الإنضغاط (على القطر الداخلي)

شكل(6-9) معادلات إجهادات المحامل وضغط الإحكام.

انه من الشائع عملياً أن يتقب القطر الداخلي للمحمل اللدائني بعد تثبيته بالضغط في المبييت. هذا الإجراء يمنع حدوث مشكلة انخفاض الخلوص الشعاعي نتيجة التوافق الإنضغاطي. الآن وبعد أن ناقشنا العوامل التي تؤثر على خلوص المحامل، ما هي الخلوصات المناسبة لتشغيل المحامل اللدائنية؟ ان العديد من مُصنعي المحامل اللدائنية يمتلكون توصياتهم الخاصة حول خلوص التشغيل، لكن الشكل(6-10) يوضح بعض الخلوصات الشائعة والتي أثبتت إنها مقنعة لأغلب المحامل اللدائنية.

لنلخص مناقشتنا على المحامل اللدائنية البسيطة، بأنه يوصى أن تصمم المحامل ضمن حدود الـ(PV)، مع ضغط تماس اعتماداً على المساحة المُسَقَّطة. كما هو الحال مع معظم المحامل البسيطة، يجب أن يكون طول المحمل من (1-2) مرة بقدر القطر الخارجي للمحمل. الفشل الأكثر شيوعاً في المحامل اللدائنية هو عدم وجود الخلوص الكافي. أبعاد المحامل يجب أن تأخذ بنظر الاعتبار الخلوص التشغيلي الموصى به، النقصان في الخلوص نتيجة التوافق الانضغاطي للمحمل مع المبييت، والنقصان في الخلوص الناتج عن ارتفاع حرارة المحمل. إن التفكير في جميع هذه العوامل سيؤدي إلى حصول الأداء الأفضل لهذه المحامل. بعض المحامل الشائعة موضحة في الشكل(6-11).



شكل (6-10) الخلوص الشائع للمحامل الدائنية البسيطة.



شكل (6-11) محامل لدائنية: بولي أميد صلب، محامل متدرجة كروية من الأسييتال، نسيج PTFE يبطن الصلب، نايلون يبطن الصلب.

6-6 التطبيقات العامة للبلى (General Wear Application)

لقد اشرنا سابقاً إلى تفاصيل استعمال اللدائن في صناعة المحامل البسيطة حيث إنها تمثل الاستخدام الرئيسي في التطبيقات الهندسية. وبالرغم من ذلك إلا إن المكونات اللدائنية تستخدم بصورة واسعة في تصميم العناصر الدوارة، كالمنزقات، الحدبات، التروس، القوالب، الموقفات وفي المئات من التطبيقات في مكونات الآلات. في جميع هذه التطبيقات، فإن الخلوص والتمدد (والتي تم الإشارة إليهما سابقاً) تبقى صحيحة. في تطبيقات العناصر الدوارة كأسطوانة على محور من الصلب وكحلقة حمل في المحامل الكروية والدحرجية، تلعب خشونة السطح (Surface Roughness) دوراً مهماً في قابلية الخدمة. إن من المفضل أن تكون خشونة السطح أقل من $(0.508 \mu\text{m})$ ، لكن الخشونة بمقدار $(0.25 \mu\text{m})$ هي الأفضل. إن السبب في هذا يعود إلى إن خشونة المعادن يمكن أن تعمل على حركة تحشية على اللدائن الطرية. فأينما يكون محتملاً، فإن الأجزاء المصنوعة من الصلب والتي تحتك بالبوليمرات، يجب أن تُصلد. ففي حالة الزجاج أو الأسبستوس المُحشى أو المُقوى لللدائن، فإن أصلد سطح محتمل أن يرافقه هو الذي يتم اختياره للحصول على عمر خدمة جيد. في تطبيقات التغليف والتي تشمل الفلوروكربون المُحشى بالأسبستوس، لقد وجد انه يتطلب اجراء الطلاء السيراميكي للمحور لمنع البلى الزائد فيه. حيث انه ليس من المحتمل مناقشة البلى في كل نظام يمكن أن تستخدم فيه مكونات البلى اللدائنية، لكن دعنا نلخص المناقشة بدرج اللدائن الشائعة التطبيق في البلى، مع بعض التعليقات العامة على خصائصها الاحتكاكية والتآكلية (Tribonetic Characteristics).

1) الفلوروكربون (الكربون المفلور) (Fluorocarbons)

من وجهة نظر معامل الاحتكاك، عند التحميل المنخفض والسرعة العالية فإن الاحتكاك سيكون عالياً. لذلك لا نستطيع أن نصنف هذه العائلة من البوليمرات ضمن البوليمرات ذات الخصائص الاحتكاكية المنخفضة.

إنشائياً الفلوروكربون هو جداً ضعيف وسوف يحدث فيه انسياب بارد تحت تأثير الحمل حتى في درجة حرارة الغرفة. لذلك فإن احتكاك الفلوروكربون وبلبان سطحه سيكون صعباً لإبقائه بسماحات بعدية قليلة في أثناء الخدمة. إن أحد أهم التطبيقات الشائعة له في الصناعة هو الطلاء التزليقي للأفلام الجافة وفي هذا التطبيق يكون طلاء البولي أميد-TFE المركب (Teflon-S) يكون جداً مفيد. المحامل البسيطة المصنوعة من TFE و FEP أو أشكال الفلوروكربون الأخرى ستزودنا بخصائص جيدة للمحامل إذا ما استخدمت بسماحات كبيرة ومع أنظمة تحافظ على الانخفاض في الانسياب البارد. إن مكونات البلى المصنوعة من الفلوروكربون

المُحشى هي الشائعة الاستخدام في الصناعة، ولكن بالرغم من ذلك إلا أنها يجب أن تستخدم بحذر.



شكل (6-12) منتجات مصنوعة من التفلون.

ان أغلب الحشوات الغير عضوية ستسبب البليان للمعدن المرافق للمكون وحتى للصلب المُصلد، إلا إنها ستعمل بشكل ممتاز ضد الطلاء السيراميكي الصلب جداً.

الشكل (6-12) يبين بعض منتجات المحامل اللدائنية المصنوعة من مادة التفلون.

(2) النايلون (Nylons)

لقد أستخدم البولي أميد لسنوات عديدة كمحامل بسيطة، عجالات، وتطبيقات أخرى لمكونات البلى وبنجاح معتبر نظراً لخواصه الميكانيكية جيدة جداً وكذلك سهولة قلوبته. أن العيب الرئيسي له هو ميله إلى امتصاص الرطوبة واستخدامه لخلوص محملي عالي. ويمكن أن تكون هذه المشكلة غدارةً في الظروف المحيطة التي تكون فيها الرطوبة عالية أو تغمر بالماء.

(3) الفينول (Phenolics)

انه مشابه للنايلون حيث يستخدم الفينول الطبائقي منذ سنوات عديدة كمكونات للبلى. حيث يمكنه تحمّل مقاومة انضغاط أكبر من أغلب الأنواع الأخرى للبوليمرات، إلا ان خصائصه الاحتكاكية (بدون تزييق) وخصائص البلى غير جيدة. في الأنظمة التي من المحتمل أن يستخدم فيها تزييقاً واسعاً، سيستطيع أن يقدم عمر خدمة جيد. ان التطبيق المُفضل له هو في صناعة المحامل البسيطة المنفصلة على الدرافيل الكبيرة (Large Rolls)، حيث ان الحمل الانضغاطي

يكون كبيراً والسرعة معتدلة. وبما انه بوليمر من نوع الثرموستك، لذلك سيستطيع أن يتحمل درجات حرارة قد تصل لغاية (204 °C).

(4) الأسييتال (Acetals)

الأسييتال كمواد هومبوليمر، كالديلرين (Delrin) وكبوليمر مشترك كالساليكون (Celecon)، وهي مواد مشهورة جداً في تطبيقات الاحتكاك والتآكل، تمتلك خواص ميكانيكية جيدة جداً؛ جاسئة، سهلة التشغيل وكلفتها معتدلة. لقد قيل بأن الأسييتالات هي أقرب أنواع البوليمرات إلى المعادن. ان هذه العبارة تأتي كنتيجة للتطبيقات الواسعة لنظام هذا البوليمر في تأدية وظائف عديدة في الأجهزة الميكانيكية التي سابقاً كانت تستخدم المعادن. وواحدة من الفوائد الرائعة للأسييتالات هي أنظمة البلى هي إن خواصه الميكانيكية الجيدة تغنيه عن استخدام الحشوات كالزجاج أو مواد غير عضوية للحصول على المقاومة العالية. لذلك يمكن أن ينزلق فوق المعادن الغير مصلدة دون الخوف من الحركة الحاكة للحشوة. تضاف الحشوات المزلقة كالـ(TFE) أو كبريتيد الموليبدنيوم في الغالب إلى الأسييتالات، لكنها ليست مواد حاكة وستعمل فقط على تحسين حد الـ(PV) وخصائص الاحتكاك. الأسييتالات بكل تأكيد علينا أخذها بنظر الاعتبار كمادة أثبتت كفاءتها في التصميم الهندسي لصناعة المكونات الإنشائية.

(5) البولي أميد (Polyimides)

وهو يعتبر من أحدث المواد التي لاقت قبولاً في التطبيقات الصناعية، فهو من الممكن أن يكون ثرموستك أو ثرموبلاستيك. ان بعض أنواع راتنجاته يمكن قولبتها بالكبس أو بالحقن؛ الأنواع الأخرى تتطلب تقنيات خاصة جداً من ميتالورجيا المساحيق. حيث أن المساحيق المكبوسة سيتم تليدها (Sintering) لاحقاً للحصول على الشكل النهائي. ان الكلفة العالية لم تحول دون استخدامه بشكل واسع في الأنظمة الإنزلاقية الغير مزلقة، لما يمتلكه من خصائص جيدة في الاحتكاك والتآكل. حيث يمكن استعماله في درجات حرارية قد تصل إلى (233 °C) ومع خواصه الميكانيكية الجيدة فانه يتفوق على الفلوروكربون. ان هذه المادة سهلة التشغيل من الشكل القياسي وتمتلك استقرارية أبعاد جيدة. حيث تتوفر هذه المادة كذلك مع حشوات مزلقة كالفضة، كبريتيد الموليبدنيوم، PTFE، والجرافيت. ونتيجةً لخواصه الحرارية العالية، يمكن أن يُشغل البولي أميد عند سرع سطحية عالية. ولولا محدودية الكلفة والتوفر، لحلت هذه العائلة من البوليمرات محل العديد من البوليمرات الأخرى المستخدمة في تصاميم تطبيقات البلى.

والخلاصة لمناقشتنا في استخدام اللدائن في تطبيقات البلى، من المحتمل حل أغلب مشاكل التصميم باستخدام أنظمة المبلمرات التي أشرنا إليها سابقاً، النايلون، الأسييتال، الفينول، البولي

أمايد، والفلوروكربون. هذا لا يعني إن الأنواع الأخرى من اللدائن سوف لن تعمل بصورة مكافئة، لكن هذه البوليمرات قد أثبتت في التصميم الصناعي الحقيقي بأنها الأفضل في الاستخدام وأغلبيتها يمكن الحصول عليها بسهولة من مُصنعي المحامل القياسية، فهي جميعاً متوفرة بأشكال قياسية للتشغيل في آلات البلى. إذا كان جزء البلى مصمماً للتطبيقات التي تشمل إنتاجية عالية، يجب الأخذ بنظر الاعتبار العديد من أنواع اللدائن الأخرى والتي ربما ستؤثر على اتخاذ القرار. عند تصميم اللدائن لتطبيقات البلى، فانه من الإلزامي أن نأخذ بنظر الاعتبار حد الـ (PV)، الخلوص، التوافق والخواص الميكانيكية. أيما يحتمل أن نستخدم اللدائن في تطبيقات البلى فانها يجب أن تحتوي على حشوات مزلقة كالـ (PTFE) والجرافيت. إذا كان الاحتكاك أمراً مهماً فعلياً إجراء اختبارات عملية على أنظمة البوليمرات، فهذه الخاصية ستعتمد بصورة كبيرة على ظروف التشغيل. مكونات البلى اللدائنية المصممة بصورة مناسبة ربما ستعرض فوائدها كثيرة في عمر الخدمة تفوق مثيلاتها المصنوعة من المعادن، والمصمم بصورة حتمية يجب أن يمتلك ذخيرة من المواد اللدائنية متوفرة لديه.

أسئلة الفصل

1. علل ما يأتي:
 - أ. تستخدم البوليمرات بشكل واسع في صناعة المكونات الإنزلاقية.
 - ب. حدوث البلى الالتصاقي في الأنظمة البوليمرية.
 - ج. ضرورة قياس (البي في) (PV) في المحامل اللدائنية.
 - د. إحلال المحامل اللدائنية محل المحامل المعدنية في بعض التطبيقات.
2. وضح كيف يتم قياس (البي في) في المحامل اللدائنية؟
3. هل يمكن تطبيق قوانين الاحتكاك العامة على اللدائن؟ ولماذا؟
4. ما هي التوصيات التي يجب أخذها بنظر الاعتبار عند تصميم المحامل اللدائنية؟
5. اذكر بعض التعليقات العامة على الخصائص الاحتكاكية والتآكلية للمواد المتبلرة التالية:
 - أ. الفلورو كربون
 - ب. النايلون
 - ج. الفينول
 - د. الأستال

الفصل السابع

تطبيقات الطلاء بالبوليمرات

THE APPLICATION OF POLYMERIC COATING

1-7 الطلاء البوليمري (Polymeric Coating)

لقد استخدم الطلاء ولقرون عديدة في أعمال الديكور أو للحماية، حيث كان الطلاء الأولي يصنع من الراتنج الطبيعية، الصبغات (Dyes)، والخضاب (Pigments). والمفاجئة أن بعض هذه الأنظمة لا يزال يستخدم لوقتنا هذا. إن الاحتياجات في الاستعمالات الصناعية كالطلاء للحماية أو للديكور هو بوضوح شديد أكثر من قبل، بحلول المواد البوليمرية الهندسية في هذا القرن مع الإتيان بأنواع متجددة من مواد الطلاء البوليمرية. إن الدهان (Paint) بتعريفنا أنه مادة طلاء عضوية ممكن أن تُصنع من طبقات رقيقة تكسى بها السطوح الصلبة. فالدهان هو مصطلح عام ضمن تصنيفات الطلاء البوليمري، لكن ليست جميع أنواع الطلاءات البوليمرية هي دهان حيث أن بعضها يطبق بطبقات سميكة جداً. إن أي طلاء سمكه أكبر من (0.25 mm) سيُستثنى من تصنيف الدهان. إن الفرق الرئيسي بين الطلاءات المختلفة المتوفرة هو في طريقة تكوينها للفلم وطبيعة البوليمر المستخدم في تكوين فلم الطلاء. بالنسبة للخصائص المستعملة، فإن أهم شيء يجب أخذه بنظر الاعتبار هو البيئة التي ستعرض إليها طبقة الطلاء. وأخيراً وواحد من أهم الأمور التي يجب أن نهتم بها في إنجاح استعمال الطلاء البوليمري هو تحضير السطح للطلاء.

2-7 تكوين الفلم (Film Formation)

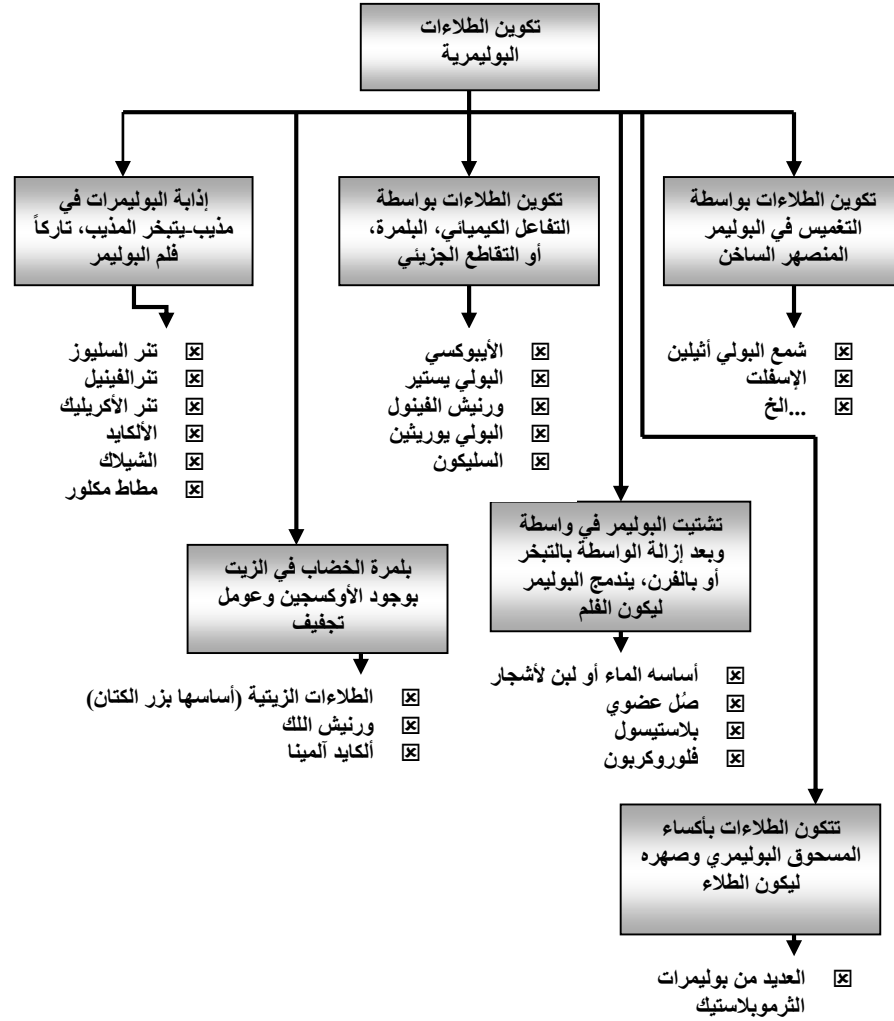
هنالك طرائق مختلفة في تطبيق الطلاء البوليمري كاستخدام الفرشة (Brushing)، الرش (Spray)، التغميس (Dip)، الاليكتروستاتك (Electrostatic)، المسحوق الجاف (Dry Powder)، الاسطوانة (rolls) هي بعض الأمثلة على هذه الأنواع.

إن تقنية التطبيق لا توجد ميكانيكية لتكوين الفلم، فهذه توجد أكثر في كيميائية الطلاء. إن غالبية أنواع مواد الطلاء البوليمرية تحتوي على البوليمر الأساسي، عوامل التلوين، ومواد كيميائية أخرى تساعد على الإنضاج أو جفاف الفلم المطبق. حيث تشمل بعض الطلاءات حدوث تفاعل كيميائي، بلمرة، أو تقاطع جزيئي؛ وبعضها فقط اندماج لدقائق البوليمر. إن الميكانيكيات المتعددة والشائعة في تكوين طبقات الطلاء البوليمري موضحة في الشكل (1-7).

يمكن حذف بعضها من خيارات الطلاء إذا كان الاختلاف الأساسي بين أنواع الدهان المختلفة مفهوماً. فمثلاً ورنيش اللك (Lacquers) والطلاءات الأخرى ستتكون بتبخر المذيب المتطاير وهي بسهولة تتميز بخصائص الجفاف السريعة. إن غالبية المذيبات هي مواد شديدة اللهب، كالأسيتون (Acetone) والكحول. الدهانات التي تكون طلاءً بأكسدة الزيت وتبخر مرقق القوام (النتر) (Thinners) والتي تكون ما يسمى بالدهان الزيتي المعمر القديم (Age-Old Oil Paint). ويعتبر زيت بزر الكتان (Linseed Oil) هو الأساس المفضل لهذا النوع من الدهانات، فهو نسبياً يجف ببطيء ويمكن ترقيق قوامه بواسطة الترينتين (Turpentine) (وهو زيت راتنجي يستخرج من أشجار الصنوبر) أو مذيبات مشابهة.

ان العديد من الطلاءات التي تتكون بالتفاعل الكيميائي، الترابط المستعرض، أو البلمرة، كالأبيوكسيدات واليوريثين، هي أنظمة ثنائية التكوين. حيث يضاف المحفز غالباً لينتج البلمرة المطلوبة أو التفاعل الكيميائي المطلوب.

ان الطلاء المتكون من تشتيت البوليمر هو أفضل تميزاً بالدهان الذي أساسه الماء، ويمتلك محتوى صلب عالي جداً، وعند تشتيته بالماء فإنه يجف بسرعة. الصل العسوي (Organosols) والبلاستيسول (Plastisols) هي أنواع خاصة للطلاء بالتشتيت حيث أنهما يسيان كقوام هلامي بالرج (Thixotropic) وهما في الغالب يستخدمان لتكوين الأفلام السمكة جداً للأقنعة أو بواتق للمكونات الكهربائية. ان الطريقة الأخيرة في ميكانيكيات الطلاء هي كما موضحة في الشكل (7-1)، وهي الطلاء بالتغميس في منصهر ساخن، والعملية تصف نفسها.



شكل (7-1) ميكانيكيات تكوين أفلام الطلاء البوليمري.

3-7 خصائص الطلاء (Coating Characteristics)

لقد ناقشنا سابقاً أهم ميكانيكيات الطلاء، دعنا الآن ننظر إلى خصائص بعض البوليمرات الخاصة والتي تستخدم في هذه الأنظمة المختلفة.

(1) ورنيش اللك (Lacquers)

وكما ذكرنا سابقاً، ان نترات السليلوز كانت أول أنواع اللدائن التجارية. هذا النظام الأساسي للبوليمر تبنيهاه لعدة سنين ماضية كأساس لأنظمة الدهان السريعة الجفاف الذي يمتلك مميزات متعددة بالنسبة لاحتمالية تعدد ألوانه. فورنيش اللك هو بالأساس بوليمر مذاب في مذيب متطاير وعندما يتبخّر المذيب، سيشكل البوليمر طبقة الطلاء الواقية المطلوبة. لا وجود للتفاعل الكيميائي سيكون مصاحباً في تكوين الفلم. ان مواد كالنتروسيليلوز (Nitrocellulose)، الفينيل، الأكرليك والألكيدات (البولي يستر) يمكن أن تُصنّع في أنظمة ورنيش اللك. وتجد نترات السليلوز تطبيقاً واسعاً في التشطيب النهائي للسيارات. ان ورنيش الفينيل (كلوريد الفينيل و

أسيئات الفينيل) يستخدم حالياً في الطلاء الواقي للمعدات الكيميائية. يستخدم ورنيش الأكريليك في الغالب في الأفلام الواقية الشفافة، مثلاً ليغطي البراص، الألمنيوم وأسطح معدنية أخرى لمنع عملية تأكسدها وفقدانها لبريقها.

(2) الشيلاك (Shellac)

من وجهه نظر التصميم، لا يستخدم الشيلاك كطبقة طلاء واقية، لكنه يمتلك خصائص غير عادية تستحق المناقشة. حيث يُصنع الشيلاك بتجميع إفرازات (Secretions) من بق اللك (Lac Bug)، حيث تذاب هذه الإفرازات في الكحول ليكون الشيلاك. يعتبر الشيلاك هو أحد أصلد التشطيبات العضوية. حيث تقاس صلادة الدهان بتسجيل تخميد التآرجح (Rocker) على السطح المدهون بما يسمى بالاختبار التآرجحي للسطح (Sward Rocker Test). إن مدى الصلادة ممكن أن يكون بحسب هذا المقياس من (1 إلى 100)، فالزجاج يمتلك صلادة مقدارها (100)؛ والشيلاك يمتلك صلادة تقريباً تصل إلى (80).

لقد أستخدم الشيلاك منذ القدم ولا يزال يستخدم إلى وقتنا هذا في صناعة الدهانات الوقائية للأخشاب، حيث يتفوق في صلادته إلا انه سريع التأثر بالماء. إن المذيب المتطاير الذي يستخدم لإذابة الراتنج، هو الكحول، وهو عملياً يعتبر متميزاً عن بقية أنواع المذيبات. يمكن استخدامه في الإحكامات تحت طبقات الطلاء التي يستعمل فيها مذيبات مهاجمة كالأسييتون والترينتين مما يحد من هجوميتها. يستخدم كذلك ليساعد على إحكام مواد الحشيات (منع التسرب) (Gasket Materials) مع السطوح المعدنية. ويمتلك دباقة (Tackiness) مميزة قبل أن نضوجه. ان غالبية البيوت تمتلك الشيلاك تحت تصرفها، وبصورة مشابهة هنالك استخدامات عديدة له في التطبيقات الصناعية.

(3) المطاط الكلور (Chlorinated Rubbers)

تذوب الراتنجات الإلاستومرية في المذيبات الهيدروكربونية لتكون عدد من الدهانات التي أساسها المطاط. حيث تمتلك هذه الدهانات مقاومة كيميائية جيدة، لكنها لا تقاوم الأشعة فوق البنفسجية (Ultraviolet) والاحتكاك. إن خاصية الامتصاصية القليلة للماء جعلتها مناسبة في الاستخدام في الانهاءات الاحكامية للخرسانة و مواد البناء.

(4) الدهانات الزيتية (Oil Paints)

ان هذا النوع من الدهانات يستخدم بصورة واسعة للطبقات الخارجية للمنتجات الخشبية، وهي أساساً عبارة عن مُعلق للخصاب في زيت بزر الكتان أو زيوت مشابهة. ويتم إضافة مرقق القوام

(النتر) والمجفف للحصول على خصائص التطبيق المطلوبة، لكن ميكانيكية تكوين الفلم سوف لن تتغير؛ حيث يتبلر الزيت ويكوّن الرابط للخضاب كما يكوّن فلم الوقاية الأساسي. حيث تُنشَط بلمرة الزيت بواسطة التركيبة الكيماوية أو الأكسدة من قبل الأوكسجين الموجود في الهواء. أن الخضاب الشائع الاستخدام في الدهانات الزيتية، كما هو الحال في أغلب الطلاءات، هو أوكسيد الزنك (ZnO) أو ثاني أوكسيد التيتانيوم (TiO₂). إن إضافة راتنج متوافق مع الأساس الزيتي سيؤدي إلى حدوث تأثير التجلد (Skinning) والذي سيزوده بلمعة ومظهراً شبه لماعاً.

(5) الورنيش (Varnishes)

انه مشابه إلى الدهان الزيتي، فالورنيش هو تركيبة من زيوت، راتنج، وعامل تجفيف. ان الورنيش الذي أساسه الزيت يتبلر بالأكسدة، ويمكن أن تغير النسبة بين كمية الزيت إلى الراتنج من البريق والخواص الطلائية الأخرى. ويؤدي إضافة الخضاب إلى أنظمة الزيت-الراتنج بالحصول على ما يطلق عليه بالمينا (Enamels).

(6) البولي يوريثين (Polyurethanes)

يعتبر من أنواع الطلاءات الحديثة نسبياً، بالرغم من إننا بينها في التصنيف بأنها تتضج باللمرة كما في الشكل (7-1)، إلا أنها تتوفر في الأنظمة التي تتصرف كالورنيش الذي أساسه الزيت و كذلك في الأنظمة التي تتصرف كورنيش اللك. ففي هذه الأشكال، يفقد اليوريثين بعض خصائص الإستومرية. لقد تم تطوير الطلاءات الشائعة لليوريثين لتتضج بالتركيب الكيميائي مع الرطوبة الموجودة في الهواء. إذا أنجز طلاء اليوريثين بواحد من هذه الأنظمة فستتطور جودة الإستومير للبولي يوريثين، وسيملك الطلاء غالباً مقاومة للحك لا مثل لها في أنظمة هذا البوليمر.

(7) الأيبوكسيدات (Epoxy)

هي ليست كالراتنج الطباقي المستخدم مع الزجاج، فمركبات الطلاء الأيبوكسي متوفرة لتكون روابط مستعرضة لتكوين الفلم الواقي. ان أهم خصائص الأيبوكسي المميزة هي التصاقه بالأساس، فهذه الخصائص مع مقاومته الكيميائية جعلته مناسباً للخدمة في التطبيقات الصناعية. ومرة أخرى فان الدهان باستخدام الأيبوكسي متوفر في أشكال أخرى غير نظام التركيبين، فبعض طلاءات الأيبوكسيدات قد تكون حتى متوفرة بشكل مشتت في الماء.

(8) البولي يستر (Polyester)

لقد تم تطوير نظام طلاء ذو تركيب ثنائي للبولي يستر، لكن تطبيقاته الصناعية محدودة بصورة عامة. ان المصطلح الشائع أكيد يشير إلى الأيستر الناتج من تفاعل الكحول مع

الحامض، والذي يستخدم كأساس لمادة أamina، ورنيش اللك، والطلاءات الأخرى. ان البولي يستير هو نظام طلائي مهم.

(9) السليكون (Silicones)

حيث تستخدم طلاءات السليكون في التطبيقات التي تتعرض فيها لدرجات حرارية عالية. فالعديد منها ستحتاج إلى فرن إنضاج للتبلر. لا يستخدم السليكون كدهان بسبب مقاومته الكيميائية المحدودة وكلفته العالية، وخصائصه الضعيفة في بناء الفلم. فإذا تتطلب الأمر منا أن نطلي جزء يتعرض لدرجة حرارة (538 °C)، فان هذه المحددات سيتم التغاضي عنها.

(10) الدهانات التي أساسها الماء (Water-Base Paints)

تتكون أغلب دهانات اللاتكس (Latex Paints) (أي دهانات عصارة الشجر) من بوليمرات مشتتة مائياً، خضاب، وعوامل لتحسين عمر المُشْتت. حيث يتكون الفلم بتبخر الماء، وحينها ستختشر دقائق البوليمر الصغيرة الحجم (أقل من مايكرون) مع الخضاب لتكون بصورة أولية فلماً مستمراً. ويصنع دهان اللاتكس من مجموعة من البوليمرات والبوليمرات المشتركة. ان بعض هذه الأنظمة المعروفة تشمل الأكريليك، أسيتات البولي فينيل وكلوريد فينيل-فينيليدين. أن فوائد تطبيق هذا النوع من أنظمة الدهان التي أساسها الماء واضحاً، لذلك فان دهان اللاتكس هو أشهر أنظمة الطلاء للجدران وبمعدل متصاعد في إنهاءات سطوح الأخشاب. بسبب المحتوى العالي للمادة الصلبة (عادةً تفوق 50%) فان هذه الدهانات تتمكن من طلاء الجدران العالية وقدرتها على تكوين الجلد جيدة.

(11) الفلوروكربون (Fluorocarbons)

كطلاء صناعي، فان الفلوروكربون هو جداً مهم. حيث تطبق طلاءات التترافلوروأثيلين (Tetrafluoroethylene) كرشاش ماء يشنت فيه دقائق بوليمرية أحجامها أقل من المايكرون، وعندما تتصهر عند درجة الحرارة المناسبة (370°C) ستكون فلم مُزَلَق ممتاز. أamina (TFE) سيمتلك مقاومة كيميائية رائعة للـ (TFE) الصلْب. ولكن يجب الحذر فان الطلاءات الرقيقة يجب أن تُستخدم للحماية من التآكل الكيميائي كبطانات الصهاريح والخزانات. إن السمك الشائع لطبقة الطلاء هو (25 μm)، ولا يمكن ضمان أن تكون خالية من الثقوب. تعتبر عمليتا الطلاء بالرشاش (Splash) أو السكب (Spill) من العمليات المتفوقة النتائج.

إن المقاومة الحاكة المنخفضة للـ (TFE) تقيد من استعماله، ولكن هذه المحددات تم تخفيضها بشكل مميز بعد إدخال الطلاءات الطبائقية للـ (TFE)-بولي أميد، حيث تتفوق هذه على فلم

الطلاء المُزلق. هنالك أنواع أخرى من أنظمة الفلوروكربون الشائعة الاستخدام؛ كالفلوروكربون-فينول، والفلوروكربون-سليولوز. حيث ان النظام الأخير لا يحتاج إلى درجات حرارة للإنضاج التي هي في المدى (260°C - 370) للـ (TFE) القويم (Straight)، ويستخدم عندما لا يُسمح باستخدام درجة حرارة إنضاج عالية.

(12) الفينول (Phenolics)

عند مناقشتنا لخواص البوليمرات، لقد تم وصف الفينول كمادة جاسئة، صلدة، وكبوليمر قوي؛ ان الطلاءات الفينولية تمتلك نفس هذه الخصائص العامة بالإضافة إلى المقاومة الكيميائية الجيدة في العديد من التطبيقات. حيث تستخدم في الغالب كطبانات للصهاريج وفي تطبيقات صناعية مشابهة حيث أن صلابته العالية وقصافته سوف لن تؤثر على قابلية خدمته.

(13) الصلّ العضوي والبلاستيوسول (Organosols & Plastisols)

ان هذه الأنظمة الطلائية شائعة الاستخدام في إنتاج الطبقات السميكة جداً (1.27 mm) والتي تعمل على حماية الأجزاء المستخدمة من المواد الكيميائية والرطوبة وما شابه ذلك. فالبولي فينيل كلورايد وصيغة كيميائية مشابهة للفينيل هي الشائعة الاستخدام في صناعة الصلّ العضوي والبلاستيوسول. ان مادة الطلاء هذه ستكون جداً تكسوتروبيك (Thixotropic) (وهي خاصية تسهيل القوام الهلامي بالزّج) والطلاء بالتغميس (Dip Coating) غالباً ما يُفضل كطريقة للتطبيق. ان من أهم تطبيقات هذا النوع من الطلاء هو طلاء الصخور، بواتق المكونات الكهربائية، أجزاء الأقفنة، وطلاء الصفائح.

4-7 إعداد السطوح للطلاء (Surface Preparation For Coating)

كما هو معروف أن أي شخص يواجه مهنة دهان البيوت، فان مقداراً كبيراً من مهنة العامل هي بتطبيق طلاء عضوي واقى على السطح المُعد للطلاء. حيث سيكون الطلاء جيداً إذا كان السطح الذي المُراد طلائه مُعد إعداداً جيداً. من الواضح إن سطح المعدن الساخن الذي يحتوي على بقع قشرية للأكاسيد وزيتية، هي أساس غير مناسب للطلاء. إن أفضل طريقة لإعداد السطح المعدني للطلاء هو الحك بالعصف (Abrasion Blasting) حيث يتم استخدام مثلاً حبيبات دقيقة من مادة السليكا النظيفة والحاكة. أما في حالة تواجد الزيوت أو الشحوم، فإنه يُفضل استخدام إزالة الشحوم بالتبخير (وليس المسح باستخدام قماش مبلل بالمذيب). إذا كانت وسائل الحك بالعصف غير متوفرة، فإننا نستطيع استخدام التجليخ بالحك (Abrasion Grinding) وإزالة الشحم بالتبخير.

يجب أن تكون الأسطح الخشبية نظيفة كذلك للحصول على الدهان المناسب. ففي التطبيقات الصناعية غالباً ما تتزايد مشكلة الدهان لسطح قد تم دهانه سابقاً. في هذه الحالة، فإن الأجزاء المنتفخة أو المتقشرة في السطح القديم، يجب أن تصقل بالورق الرملي وتُبرّد بالمبرد لمنع ظهور تحول ظاهر للعيان في سمك طبقة الطلاء المطبقة. يجب مسحه بعد ذلك بالمذيب لإزالة طبقات الزيت. إن استخدام المذيبات المكلورة كالتريكلوروأثيلين (Trichloroethylene) في الغالب سيؤدي بالعرض. أما المواد الشمعية التي على السطح، فإن أفضل طريقة لأزالتها هي باستخدام المذيبات العطرية (الأروماتك) كالتالوين (Toluene) أو البنزين. أنه من الجيد إجراء اختبار للدهان الجديد لقياس مدى التصاقه على الدهان القديم قبل أنجاز العمل كله.

غالباً ما تحتاج أسطح البناء والخرسانة إلى التنظيف بمغطس حامضي (Pickling)، مثل حامض المورياتيكي (Muriatic Acid) أو حامض الهيدركلويك، لكي يتم إعدادها بشكل مناسب للدهان. إن استخدام المنظفات القوية كفوسفات الصوديوم الثلاثية (Trisodium Phosphate) سيكون في الغالب فعالاً ومؤثراً جداً على الخرسانة الأرضية.

5-7 تطبيق الطلاء (Coating Application)

هنالك العديد من التقنيات المستخدمة في الطلاء العضوي، وكل نظام يمتلك فوائد وعيوب. يتفق الغالبية بان نظام التبريد الهوائي هو ليس فعالاً حيث أن هنالك كميات كبيرة من المادة ستفقد أثناء التذرية. إن تطبيقات غالبية منتجي الدهانات اليوم، تميل إلى استخدام الأليكتروستاتك، اليكتروفورتيك (Electrophoretic) وأنظمة مشابهه والتي جميعها تميل إلى تقليل فقدان الدهان بكميات كبيرة أثناء عملية الطلاء.

ان التغطية النسبية للأنظمة المطبقة هي كما مبينة في الجدول (7-1). من الواضح إن تقنية التذرية (Spray) تكون أكثر كفاءة من استخدام عجلة الدهان التي يجب أن تعالج السطح المدهون من حين إلى آخر. الأمر الآخر هو سمك الفلم، كيف يستطيع الواحد منا أن يعرف ما هو السمك المستعمل؟ البيئة الصناعية العامة تتطلب ربما (125 µm) للحماية الكافية. بينما الأسطح المغمورة ربما ستتطلب سمكاً من (125 - 625 µm). فلايجاد سمك الفلم لطبقة الدهان الواحدة، يجب أن ننظر إلى النسبة المئوية لمحتوى المادة الصلبة. إن سمك (25 µm) هو فلم رطب يحتوي على (50%) صلب سوف يعطي فلم جاف سمكه (12.5 µm) عندما يجف. الغالون الواحد من أي سائل يطبق على السطح بسمك رطب مقداره (25 µm) سيغطي مساحة (150 m²). باستخدام هذا كدليل، ممكن أن نحسب الغطاء الذي سنحصل عليه من جالون واحد من الدهان لسمك معين.

جدول (7-1) مقارنة بين كمية الدهان الممكن تغطيتها على مساحة مسطحة كبيرة في يوم عمل واحد لشخص.

المنطقة المغطاة باليوم		
الغالون #	القدم المربع *	طريقة الطلاء
8	1,000	الفرش
12	-2,000 4,000	العجلات
20	-4,000 8,000	ترذيذ هوائي (خلط خارجي)
40	-6,000 10,000	ترذيذ هوائي (خلط داخلي)
75 وأكثر	-8,000 12,000	ترذيذ لا هوائي

* القدم المربع = $9.29 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ؛
الغالون = $3.785 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

6-7 اختيار الطلاء المناسب (Coating Selection)

لقد ناقشنا سابقاً كيفية تكوين طبقات الطلاء البوليمرية، وتقنيات تطبيقها، لكننا سنتكلم هنا عن مسألة كيفية اختيار الطلاء المناسب للاستعمال الصناعي المناسب.

إن المكان الجيد للبدأ فيه عند الاختيار هو الظروف البيئية التي على طبقة الطلاء تحمّلها. وهل أن الطلاء يرغب من الناحية الجمالية أم هو لغرض حماية سطح معين؟ هل الطلاء داخلي أم خارجي؟ هل يجب أن يكون مقاوم للمذيبات، القواعد، الزيوت، والحوامض؟ إذا كان كذلك فكم هي تراكيزها؟ هل التغميس هو المحتمل أو سوف تكون عملية طلاء بسيطة كالترشيح أو السكب؟ ما هي درجة الحرارة التي يجب أن يتحملها الطلاء؟

حالما تحصل على أجوبة الأسئلة السابقة، فانك ستستطيع الاستمرار مع عملية الاختيار. الجدول (7-2) يوضح مقارنة بين خواص بعض الطلاءات الشائعة الاستخدام في الصناعة. واحد من الطلاءات الشائعة الاستخدام والغير موجودة ضمن الجدول هي طلاءات الإنضاج الرطب للبولي يوريثين. الجدول (7-3) يبين بيانات البلى لهذه المواد. الاستنتاج الواضح الذي نحصل عليه من هذه البيانات هو انه لبيئة تتطلب مقاومة حك عالية ومتعددة، فان الطلاء الأفضل هو اليوريثين.

بقدر ما يريد الواحد منا أن يختار نظام طلاء واحد، فان هذا ليس ممكناً هنا لنضع عبارة تقول أن هذا هو الأفضل، " للآلات المغمورة بالزيت فإنها تستخدم دهان الأيبوكسي"، فكل بائع لدهان

الأيوكسي يمتلك تركيبة مختلفة وخواص مختلفة. وحتى نختار بطريقة كفؤة لطلاء عضوي في تطبيق صناعي فإنه من الموصى به أن يتعرف المصمم على أنظمة الدهان المختلفة والتي ناقشناها سابقاً.

الجدول (4-7) يدرج مجموعة من الطلاءات التي تقي بالغرض لظروف بيئية مختلفة في عمليات التصنيع الكيميائي. بالإضافة إلى ذلك، فإن طلاءات الفلوروكربون TFE و FEP والبولي اميد - فلوروكربون تزودنا بحماية للعديد من الظروف البيئية المتضمنة الحوامض، القواعد، والمذيبات. يجب أن نحدد بأنه بالرغم من ذلك فإن هذه الطلاءات لا يمكن أن تطبق بسُمك (25 µm) دون أن يحدث تشققات فيها. لهذا السبب وبسبب كلفتها العالية ودرجة الإنضاج العالية التي تحتاجها وهي أكبر من (260°C) فإننا في الغالب نستخدمها للأجزاء الصغيرة التي تتعرض للترشيش أو السكب أو عندما تتطلب طلاءات الفلوروكربون أن تكون على شكل فلم تزيق جاف. لتلخيص مناقشتنا حول الطلاءات العضوية، فإن المصمم يجب أن يفهم أنظمة الطلاء المختلفة، وأن يلم بالظروف البيئية والتطبيقات المطلوبة، وأخيراً عليه أن يأخذ هذه الأمور بنظر الاعتبار عندما يحدد اختياره. إن تهيئة السطح للطلاء واستخدام بطانة للدهن (Primer) له أو إجراء معالجة أولية له هي من الأمور المهمة في الطلاء. فعليه التحقق من هذه الأمور خلال اختيار الطلاء المناسب. ربما لا يزال على المصمم ان يجري التحليلات النهائية باختبار الخدمة للطلاء وعند بائعين مختلفين، ويجب أن نتوقع ذلك، حيث انه لا يوجد هنالك مصنع يقبل باستخدام طلاءات عديدة للآلات أو لعمليات التصنيع، حيث ان هنالك الملايين من البيوت في هذا البلد وتدهن بمئات التركيبات المختلفة. كل مالك لبيت قد تعلم انه لا يوجد هنالك طلاء واحد ولا أسم واحد سيزوده بطلاء يدوم للأبد. ما قمنا باستعراضه هنا يجب أن يكون عامل مساعد أكثر مما أن يكون عامل قطعي لاستخدام للطلاء العضوي الناجح.

جدول (7-2) خواص بعض اللدائن العضوية

الخاصية	الصلادة	الاتصاق	المرونة	مقاومة التلف	البريق (80 وحدة زائد 060)	قابلية التصنيع بعد التعتيق	مقاومة الرطوبة	مقاومة الشحوم والزيوت	المقاومة الكيميائية العامة	مقاومة التآكل الكيميائي العامة (بيئة)
أمين-الكوب	2	2	3	2	1	4	2	2	3	2
البولي بيستير (الخلي من الزيت) ^أ	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2
فينيل الكوب	2	2	2	2	2	2	1	2	3	2
محلول الفينيل (PVC)	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2
صل عضوي ^ج	2	1	1	3	3	1	1	1	1	1
بلاستيبول ^د	3	2	1	3	4	1	1	1	1	1
أبيوكسي قوريم	1	1	2	1	1	3	1	1	1	1
أبيوكسي - أيبستر	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2
أكر بليك ثرموست ^أ	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2
سليكون الكوب ^أ	2	2	3	2	1	3	2	2	2	2
سليكون أكر بليك ^أ	2	2	3	2	1	3	2	2	2	2
سليكون بولي بيستير ^أ	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2
بولي فينيل قوراي ^د	2	2	1	3	4	1	1	1	1	1
بولي فينيلين قوراي ^د	2	2	1	3	4	1	1	1	1	1
فلم طبائقي من بولي فينيل قوراي ^د	2	2	1		4	1	1	1	1	1
فلم طبائقي من بولي فينيل قوراي ^د	2	1	1	2	4	1	1	1	1	1
فلم أكر بليك طبائقي	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1

أنواع الطلاءات الأخرى	
38	الأمين المحفز للورنيش الأيبوكسي (Amine Catalyzed Epoxy Varnish)
60	جزأين من مينا البولي يوريثين (Two-Part Polyester Urethanes Enamel)
95	مينا أيبوكسي البولي أميد (Polyamide Epoxy Enamel)
96	ورنيش اللك نايتروسليلوز الواضح (Clear Nitrocellulose Lacquer)
106	مينا الفينيل (Vinyl Enamel)
155	ورنيش زيت اليوريثين (Urethane Oil Varnish)
172	ورنيش سبار الفينول (Phenolic Spar Varnish)
196	مينا أيبوكسي (Epoxy Ester Enamel)

* قيمة مؤشر تابير تشير إلى الوزن المفقود في (mg) لكل (1000) دورة في اختبار الحك.

جدول (4-7) أنواع الطلاءات في العمليات الصناعية الكيماوية.

الطلاء	التطبيق
البولي فينيل كلورايد (نظام مذيب)	على المعادن لمقاومة الحوامض والقواعد والسطوح الخارجية للمعدن
أيبوكسي أمين (تركيبين)	على المعادن والسطوح الأخرى لمقاومة المذيبات
بولي فينيل أسيتيت (أساسه الماء)	طلاء خارجي على البناء والديكور لطلاءات داخلية على الأخشاب والمعادن.
ألكيد (زيت متأكسدا)	طلاء داخلي شبه براقا أو طلاء براق للديكور على الخشب والمعدن
بولي يوريثين المنضج بالرطوبة	طلاء أرضي واضح و إنهاء ستاني (Satin) لمينا المكائن
بولي يوريثين ذي تركيبتان	مينا مقاوم للزيت في المكائن، الصهاريج، الأنابيب....الخ

أسئلة الفصل

1. ما هي الأمور التي يجب الاهتمام بها عند استخدام الطلاء البوليمري للسطوح؟
2. ما هي ميكانيكيات تكوين أفلام الطلاء البوليمري؟ أشرحها باختصار.
3. اذكر أهم خصائص أفلام الطلاء باستخدام المواد البوليمرية التالية:
 - أ. ورنيش اللك
 - ب. الشيلاك
 - ج. المطاط المكلور
 - د. الدهانات الزيتية
 - هـ. الورنيش
 - و. البولي يوريثين
 - ز. الايبوكسيدات
 - ح. البولي يستر
4. ما هي الميزة التي يتميز بها طلاء السليكون عن بقية أنواع الطلاءات البوليمرية؟ ولماذا لا يستخدم كدهان؟
5. كيف يتم إعداد السطوح للطلاء؟ وما أهمية ذلك؟
6. هنالك تقنيات عديدة تستخدم في تطبيق طبقة الطلاء العضوي، اذكرها مبيناً ميزة كلٍ منهما؟
7. ان اختيار الطلاء المناسب من الأمور المهمة في إنجاز الطلاءات وتأدية الدور المطلوب منها، ما هي الأمور التي يجب الاهتمام بها عند اختيارنا للطلاء المناسب؟

الفصل الثامن

استخدامات البوليمرات كمواد لاصقة

THE APPLICATION OF POLYMERS AS ADHESIVE MATERIALS

1-8 اللصوقية (Adhesives)

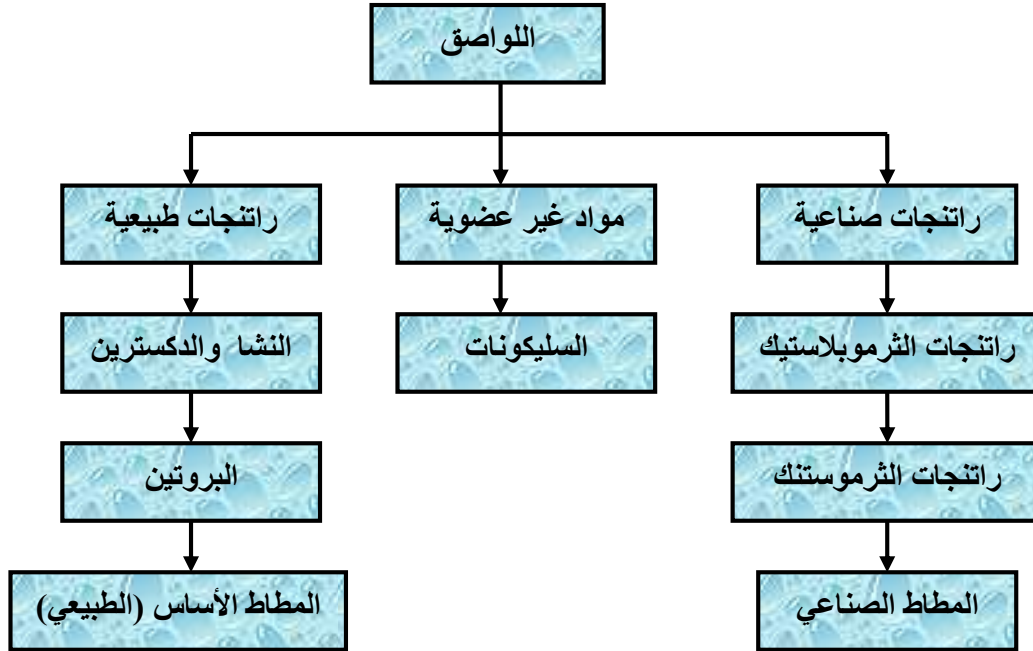
يعتبر استخدام المواد البوليمرية كمواد لاصقة من أهم وأكثر التطبيقات المضمونة للمواد البوليمرية. لقد استخدمت الروابط الالتصاقية مع النبات والحيوان كمنتجات ثانوية لآلاف السنين. مع حلول بوليمرات الترموبلاستيك والترموستيك، فإن مجال استخدام اللصوق أخذ منحى جديد. لقد تم تطوير اللصوق التي تمتلك مقاومة أعلى من مقاومة بعض المعادن. أن العديد من المعلبات التي تباع في الأسواق يتم أحكامها بلصوق ساخن-منصهر بدلاً من لحام القصدير. إن الغرض من مناقشتنا لهذا الجزء هو بيان المواد اللاصقة الجديدة وبيان كيفية استخدام هذه المواد في التصاميم الهندسية.

2-8 تصنيف البوليمرات اللاصقة

(Classification of Adhesive Polymers)

غالبية مُصنعي اللصوق يتفقون على تصنيفها بموجب التركيب الكيميائي، شكل (1-8). واحد من أكثر اللصوق الطبيعية المألوف هو النشا والكربوهيدرات التي أساس تصنيفها هو لصوق القمح (Wheat Paste)، للصمغ الأبيض الذي يصنع من الماء والدقيق (الطحين). يعتبر النشا والدكسترين (صمغ نشوي) (Dextrin) هما اللاصقين الشائعي الاستعمال في تصنيع الحاويات الكرتونية (الورق المُقوى). ويستخدم الدكسترين في الغالب كلاصق لإحكام غلق المظروف. تسمى اللصوق التي أساسها البروتين، بالغالب غراء آمين (Enamel Glue). لقد تم تركيب بعض اللصوق البروتينية من جلود الحيوانات والأشكال الأخرى لعظام الحيوان. ان هذه اللصوق هي جداً رخيصة وتستخدم في العديد من التطبيقات كاللصقات (Labels). حيث يطبقون بشكل ماء

شبه غروي (Water Colloids) و قابل للترطيب. الكيسيانز (Caseins) هو أيضا لاصق أساسه البروتين، ويتم الحصول عليه بتفاعل الحامض والحليب. وهو نسبياً غير ذائب ويستخدم في الغالب كملصقات على القناني والعلب التي من المحتمل أن تتربط أثناء الاستخدام. يستخدم كل من



شكل (1-8) تصنيف اللواصق.

المطاط الطبيعي والشيلاك في بعض التطبيقات، لكن استخدامهما ثانوياً في الصناعات المهمة. هنالك أعداداً لا تحصى من الراتنجات الصناعية والتي تجد تطبيقات واسعة كمواد لاصقة. ان المواد الثرموبلاستيكية التي تستخدم كلاصقات تشمل الفينيل، أيستر السليلوز، والألكايد وأيستر الأكريليك والعديد من البوليمرات المشابهة لها. أما لواصق الثرموستيك، التي تتبلر للإنضاج، فتشمل الأبيوكسيدات، اليوريا، الفيورين (Furan)، الفينول، فورمالديهايد الريزورسينال (Resorcinol Formaldehydes) والبولي يستير. يعتبر المطاط الصناعي كمادة مهمة جداً باستخدامه كلاصق. حيث أنه متعدد الاستخدامات نتيجة لتوفر أنواع عديدة منه، مثل الـ (SBR) والنيترايل (Nitrile)، النيوبرين (Neoprene)، والبولي سالفيد (Polysulfide). ان معظم اللواصق التي أساسها المطاط تتضج بواسطة تبخر المذيب، ويمكن الحصول على خواص مختلفة عند تغيير نظام المذيب والمطاط. أن المصطلح الشائع للواصق التي أساسها المطاط هو التماس الأسمنتي (Contact Cement). ان تطبيقات هذه اللواصق مختلفة، وربما لا يوجد تطبيق واحد يمكن أن يخصص لاستخداماتها. هذه هي المعروفة بالغراء الأبيض (White

(Glue) والتي تباع في مختلف المخازن حيث تستخدم بشكل واسع في ربط الأخشاب. ان اللواصق الهندسية الأكثر شيوعاً هي الأيبوكسيدات، حيث إنها تتوفر في أشكال وتراكيب مختلفة، كما سنرى ان لها تطبيقات واسعة في العديد من تصاميم الوصلات للمواد الهندسية.

3-8 ميكانيكيات الالتصاق (Mechanisms of Adhesion)

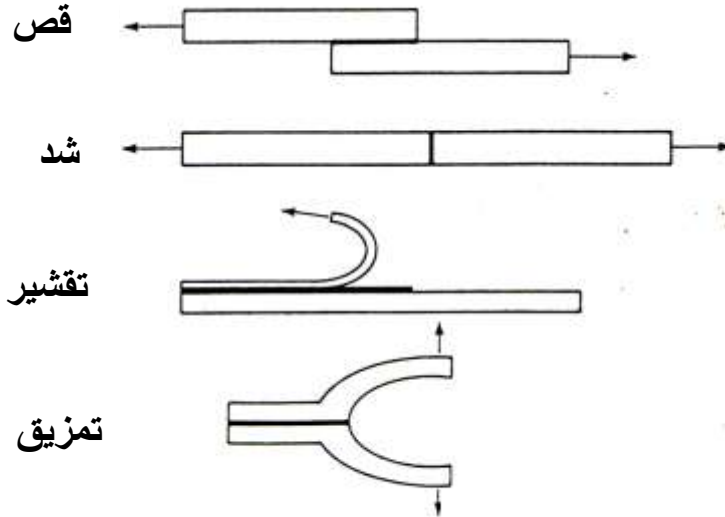
الكثير منا استخدم اللاصق مرة من المرات ولكن القليل منا فكر في كيفية الحصول على ميكانيكية الارتباط. ما الذي يجعل الغراء يلتصق؟ هنالك مدرستان للتفكير في هذا الموضوع. ان بعض خبراء اللاصق يقولون أن الالتصاق هو ببساطة نتيجة للأفعال الميكانيكية بين اللاصق والمادة الخاضعة لللصق. حيث ان جميع السطوح، وحتى الصقيلة منها، ستتكون من تلال وأودية ميكروسكوبية. إذا كان السطح مرطباً بواسطة اللاصق، فان اللاصق يمكن أن يصبح قفلاً ميكانيكياً لمايكروطبوغرافية السطح.

أما المدرسة الأخرى فهي تعتقد بان ميكانيكية الارتباط هي جزيئية أو هي روابط من نوع فان دير فال بين جزيئات اللاصق وجزيئات اللدائن الملصوق أو بين ذرات المعدن الملصوق. لا يتفق أحداً بالضبط على نوع الميكانيكية، لكنها ربما ستكون تركيبة لكل من القوى الجزيئية أو الذرية والأفعال الميكانيكية. على أي حال، لقد تم الإشارة في العديد من البحوث إلى أن تخشين السطوح الملصقة سيؤدي الى الحصول على روابط جيدة.

1-3-8 صلابة الرابطة (Bond Strength)

يمكن الحصول على العديد من قيم الصلابة للروابط باستخدام لواصل مختلفة، لكن من المهم أن نأخذ بنظر الاعتبار نمط التحميل (Mode of Loading) الذي ستتعرض له وصلة الارتباط الملصقة كما في الشكل (2-8).

ان معظم اللواصق تتفوق في تحميل الشد، لكن في جميع تصاميم الوصلات الملصقة يجب تجنب نمط التحميل للتقشر (Peel) أو للتمزق (Tear). لأنه في نمطي الشد والقص سيتم توزيع الحمل على جميع مساحة وصلة الارتباط، أما في هذين النمطين من التحميل فإنهما سيعملان على تركيز الإجهادات في منطقة محددة جداً.



شكل (2-8) أنماط التحميل للوصلة الالتصاقية.

ان العامل الآخر الذي يجب أخذه بنظر الاعتبار في تحليلات الصلابة للروابط اللاصقة هو البيئة ومستوى الصلابة المطلوبة. فإذا أردت مثلاً أن تصمم روابط التصاقية لرفع جهاز كتلته (23 kg) لجزء من آلة، فانك تستطيع استخدام لاصق مع صلابة قص قدرها (0.689 MPa) وستعمل مساحة الارتباط بمقدار (3.2 cm²). يجب عليك أن تستخدم هذا النوع من التحليلات لصلابة الوصلة في جميع تصاميم الوصلات الالتصاقية.

2-3-8 اختيار اللاصق (The Selection of Adhesion)

ان العوامل البيئية التي يجب أخذها بنظر الاعتبار على الوصلات الالتصاقية هي مشابهة إلى العوامل التي تستخدم في الطلاءات العضوية. ما هي درجة الحرارة القصوى للخدمة؟ ما هي المقاومة الكيميائية المطلوبة؟ هل من المطلوب صلابة طويلة الأمد؟ ما هي أنواع المواد المراد لصقها؟

فبعد الإجابة على جميع هذه الأسئلة وبعد إيجاد الصلابة القصوى المطلوبة للاصق، فانك ستستطيع اختيار اللاصق المناسب. فهناك المئات من اللواصق التجارية المتوفرة، إلا ان تطبيقات التصميم من حيث كلفة اللاصق ليس محل الاهتمام حيث أن المجاميع التالية للواصق ربما ستفي بالغرض:

1. الأيبوكسي (Epoxy)

ينضج الأيبوكسي - بولي أميد (تركيبان) بدرجة حرارة الغرفة، وينشأ عنه صلابة قص قد تصل لغاية (13.8 MPa) عند درجة حرارة (38 °C) و (0.689 MPa) عند درجة حرارة (149 °C).

2. أيبوكسي-بولي أميد المُحشَى (Filled Epoxy Polyamide)

تنشأ فيه نفس صلابة الأيبوكسي السائل لكن الحشوات ستجعل منه لاصقاً ثيكسوتروبيك* (Thexotropic). هذه الخاصية تساعد في إملء الفجوات الكبيرة.

3. راتنج الأكريليك (Acrylic Resin)

يذوب هذا الراتنج في كلوريد المثلين ويوصى به لربط الأكريليك مع نفسه والى السليلوز، الستيرين، البولي كربونيت والبولي فينيل كلورايد الجاسيء. يمكن أن تنشأ عنه صلابة قد تصل إلى (6.89 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

4. سمنت الفينيل المُلدن (Plasticized Vinyl Cement)

ان الفينيلات المدنة تكون ملدنة بدرجة كبيرة وصعبة الارتباط. لذلك يستخدم سمنت خاص يقاوم فعل تحرير المدنات. ان هذا التماس الأسمنتي سوف يربط الفينيلات مع أغلب المواد بصلابة قص مقدارها (0.689 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

5. اللواصق المذيبة (Adhesive Solvent)

(أ) كلوريد المثلين سوف يربط البولي كربونيت بنفسه بصلابة قص تصل لغاية (6.98 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

(ب) 95% سائل مائي للفينول سوف يربط النايلون بالنايلون، ويُنشئ صلابة قص قد تصل لغاية (6.89 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

(ج) (البي في سي) المذاب في التتراهايدروفورين (Tetrahydrofuran) سيربط بين البي في سي الجاسيء و ABS والى نفسيهما مع صلابة تصل إلى (6.89 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

(د) مونومير الستيرين يمكن أن يستخدم لربط الستيرين (غير الرغوي) بنفسه مع صلابة تصل إلى (6.89 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

(هـ) أيستر الأكريليك في التالوين يمكن أن يستخدم لربط السليلوز مع البي في سي الجاسيء والستيرين والى نفسيهما مع صلابة تصل إلى (6.89 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

*تسييل القوام الهلامي بالرج.

6. اللواصق التماسية (Contact Adhesives)

باستثناء البوليمرات الشمعية مثل الفلوروكربون الغير معالج، البولي أثيلين، والبولي بروبيلين، فان هذه اللواصق سوف تربط أغلب المواد مع صلابة قص مقدارها (0.689 MPa) عند درجة حرارة (38 °C).

7. الفينيل المشترك (Vinyl Copolymer)

الماء المستحلب للفينيل المشترك والمعروف بالغراء الأبيض للأخشاب. يمكن أن تصل صلابته إلى (20.7 MPa) عند درجة حرارة الغرفة ويستخدم لربط الخشب ببعضه البعض.

8. المطاط السليكوني (Silicone Rubbers)

المطاط السليكوني الذي يفلكن في درجة حرارة الغرفة سيربط أنواع عديدة من المواد. مطاط (الأر تي في) (RTV Rubber) الغير المحشى يمكن أن ينشأ صلابة قص قد تصل لغاية (1.38 MPa) عند درجة حرارة (149 °C)، وأما النوع المحشى من مطاط (الأر تي في) فانه سينشأ صلابة قد تصل إلى (1.38 MPa) عند درجة حرارة (316 °C).

9. ساينوأكريليت (Cyanoacrylates)

هذه هي لواصلق لا هوائية مصممة للإنضاج بشكل وصلات قوية بين المعدن والمعدن. يمكن الحصول على صلابات مختلفة لمسك البراغي بشدة، تمسك المبيبات والتروس، وتطبيقات أخرى مشابهه.

إن الوصف المختصر لكل لاصق من هذه اللواصق سيخدمنا كدليل أولي للاختيار، لكن الجدول (1-8) الذي يدرج اللواصق الأنفة الذكر والتي يمكن أن تستخدم في الوصلات الإنشائية مع صلابة ربط حدها الأدنى (3.45 MPa). إن إجراء التحليلات على الجدول سوف تشير إلى ان الأيبوكسيديات بصورة عامة تزودنا بأفضل صلابة للروابط. ان الروابط ذات الصلابة المنخفضة يمكن ان تنجز مع أي مادة في الجدول بوجود اللاصق التماسي. ومشابه لذلك، فان المطاط السليكوني يربط مواد متعددة ولكن بصلابة ربط نسبياً أقل. بعض البوليمرات

جدول (8-1) اللواصق لربط المواد مع مقاومة قصية بالشد مقدارها (3.45MPa) في درجة حرارة (38°C).

اللدائن	الأكريليك	السليولوز	سباتك النحاس	الإلاستومير (غير السليكون)	الأبيوكسي	النسيج الطبيعي	سباتك الحديد والألمنيوم	الفلوروكربون المعالج	الزجاج والسيراميك	مواد البناء	البولي ستيرين	الفينول	أستيتال	النايلون	البولي كربونيت	البولي يستر	البي في سي الجاسيء	البي في سي الملدن	السليكون	الخشب
الأكريليك	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	3			1
السليولوز		5	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	5			1
سباتك النحاس			1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
الإلاستومير (غير السليكون)				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
الأبيوكسي				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
النسيج الطبيعي				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
سباتك الحديد والألمنيوم				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
الفلوروكربون المعالج				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
الزجاج والسيراميك				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
مواد البناء				1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1						1
البولي ستيرين				1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1						1
الفينول				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
أستيتال				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
النايلون				1	1	1	1	1	1	1		1	1	5						1
البولي كربونيت				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	5					1
البولي يستر				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
البي في سي الجاسيء				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1			5			1
البي في سي الملدن				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
السليكون				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						1
الخشب				1	1	1	1	1	1	1		1	1	1						7

ملاحظة خاصة بالجدول (5-8)

الأرقام 1 و 2... الخ تشير الى رقم اللاصق كما ورد في ترقيم الفقرة (اختيار اللاصق)، فمثلاً 1 يعني الأبيوكسي و 5 هو أيسستير الأكريليك وهكذا. الفراغات الموجودة في الجدول تعني اننا لا نستطيع الحصول على وصلة بمقاومة قص بالشد بمقدار (3.45 MPa).

يمكن ربطها بصورة ملائمة باستخدام اللاصق المذيب. الفينيل الملدن يحتاج الى لاصق خاص، وأدائه جيد في الاختبارات باستخدام تركيبات مختلفة لإيجاد لواصل فعالة. ان بعض المعادن، ستتصرف كالفينيل الملدن حيث تكون صعوبة الالتصاق. فالزنك والرصاص، بسبب طبيعتهما ولوجود الأكاسيد السطحية فيهما، سيصعب لصقهما. ان سبائك النحاس كذلك صعوبة الالتصاق بعض الشيء، لكن استخدام تركيب خاص للأبيوكسي يمكن ان ينجز المهمة بنجاح. معظم الأبيوكسيديات هي مقاومة للمواد الكيميائية. السايانوأكريليك والفينيل (الغراء الأبيض) المستحلب هي لواصل ليست مقاومة للرطوبة. ان اللاصقات اللاهوائية هي مفيدة بشكل استثنائي لوصل مكونات الآلات. لم يتم إدراجها في الجدول (8-1) ببساطة لان هنالك أنواع كثيرة منها. الخلاصة هي إننا عندما نريد ان نختار اللاصق فانه من المفضل ان نكون ملمين باللاصقات المدرجة، بخصوصيتها، بخواصها، وبتطبيقاتها. ان استخدام الجدول (8-1) كدليل مرشد، سيمكننا من ان نتخذ قراراً نهائياً. أما إذا كان اللاصق المنشود سيتعرض إلى أي ظروف غير درجة حرارة الغرفة والرطوبة المحيطة، فسيستوجب حينها إجراء بعض البحوث على اللواصل ضرورياً. ان جميع اللواصل المدرجة في الجدول باستثناء لاصق الخشب الفينيل، ستمتلك مقاومة جيدة للرطوبة. اللواصل التي أساسها المطاط والأبيوكسيديات ستمتلك مقاومة كيميائية جيدة.

4-8 تطبيقات اللواصل (Adhesive Application)

كما ذكرنا سابقاً بأن ميكانيكية الوصل هي جزئياً عبارة عن أقفال ميكانيكية بين اللواصل والملصوق. لضمان الحصول على أفضل تأثير للإقفال الميكانيكي، فان سطح المادة الملصوقة يجب ان يسفع بالحبيبات (Grit-Blasted) أو يُخشَّن بالحك (Abraded). ان جزء الآلة المشغل بصورة جيدة يمكن ان يولد ذاتياً سطحاً خشناً مناسباً للالتصاق. إلا ان هنالك القليل من اللواصل كاللواصل اللاهوائية، ستتطلب ان تكون سطوح السطوح الملصوقة صعبة، فكلما كانت أكثر صقلًا كلما كانت أفضل، للحصول على أفضل ارتباط، لكن هذه اللواصل استثنائية. ان تنظيف السطوح الملصوقة هو أهم الأمور الواجب توفرها عند إجراء عملية الالتصاق. في حالة المعادن، فان إزالة الشحوم بالبخار باستخدام مذيب مكلور هي طريقة فعالة. اذا كان هنالك وجود للشمع على السطوح الملصوقة، فان المذيبات العطرية كالبنزين أو التالوين ستكون ضروريةً للتنظيف. ان معظم الأبيوكسيديات، كما هو الحال مع معظم اللواصل الأخرى (باستثناء أنظمة المذيب)، ستتطلب وجود خلوص كافي بين الأجزاء المراد لصقها. يجب ان يتراوح سمك الأفلام اللاصقة بين الأجزاء الملصوقة من (75 – 250 μm). هنالك طرائق عديدة يمكن بواسطتها تطبيق المادة اللاصقة على السطح كاستخدام الفرشاة، التريذ، استخدام العجلة، الطلاء، الممسحة المطاطية (Squeegee)، وغيرها. الأمر المهم الذي يجب الاهتمام به هو ان كلا

السطحين يجب ترطيبهم باللاصق. وأخيراً يوصى بأننا يجب ان نراقب عملية دورة الإنضاج لللاصق.

يمكن القول بخلاصة ان اللواصق يمكن ان تستخدم في وصل المواد الهندسية إذا ما اختيرت بحيث تمتلك الصلابة المطلوبة ويجب التفكير في البيئة المحيطة باللاصق بشكل جيد. نسبياً هنالك القليل من اللواصق التي يمكن ان تلبي جميع متطلبات الخدمة، مع التفكير بنظافة وترطيب السطوح الملتصقة، فإننا نستطيع حينئذ الحصول على روابط ناجحة.

أسئلة الفصل

1. صنف المواد البوليمرية اللاصقة؟
2. ما هي ميكانيكية الالتصاق؟
3. ما هي صلابة الرابطة؟ وما هي العوامل التي تؤثر عليها؟ بين ذلك تفصيلاً؟
4. ان عملية اختيار اللاصق من الأمور المهمة، ما هي الأمور التي يجب أن تأخذها بنظر الاعتبار عند إجراء ذلك؟
5. ما هو تأثير إعداد السطوح الملصقة على كفاءة الالتصاق؟
6. بالاستعانة بالجدول (8-1) بين ما هي اللواصق المناسبة للصق المواد التالية:
 - أ. السليلوز - سبائك الحديد
 - ب. النايلون - البولي كربونيت
 - ج. البي في سي الجاسيء - الخشب
 - د. الزجاج - الزجاج
 - هـ. السيراميك - سبائك الألمنيوم

الفصل التاسع

تقنيات لحام اللدائن

Plastic Welding Technology

1-9 مقدمة

ان الوصلات الميكانيكية، المواد اللاصقة، واللحام هي عمليات يمكن ان تطبق جميعها للحصول على الوصلات بين اللدائن الهندسية. فالوصلات الميكانيكية يمكن ان تربط بين جزئين بسرعة، إلا إنها لا تزودنا بوصلة مانعة للتسريب، وستنشأ عنها اجهادات موضعية والتي قد تؤدي فشل الوصلة. المواد اللاصقة يمكن ان تزودنا بخصائص جيدة ووصلات قوية، إلا إنها يصعب التعامل معها لبطيء إنضاجها. كذلك يجب الاهتمام بتحضير ونظافة الوصلة للحصول على الترابط بالمواد اللاصقة. أما اللحام لللدائن فهو يقتصر على نوع لدائن الترموبلاستيك لأن هذا النوع من اللدائن يمكن أن يتلين خلال عملية التسخين، أما لدائن الترموستنك فهي حالما تتصلب فسوف لن نستطيع إعادة تليينها مرة أخرى لذلك فلا يمكن لحامها. ان الحرارة المطلوبة لإجراء عملية اللحام لللدائن الترموبلاستيك هي أقل بكثير عن الحرارة المستخدمة في لحام المعادن.

ان لحام اللدائن هو عبارة عن عملية وصل قطعتين من لدائن الترموبلاستيك وهما في الحالة الساخنة وتحت تأثير ضغط وكنتيجه لذلك سيحدث الترابط المستعرض (Cross Linking) لجزيئات البوليمرين. حيث ستلتحم القطعتين سوياً مع أو بدون استخدام مواد لاحمة (Filler Material). يتم تبريد منطقة الوصل (اللحام) إلى درجة أقل من درجة التحول الزجاجي (للبوليمرات الغير عضوية) أو أقل من درجة الانصهار (للبوليمرات المتبلورة). لا يمكن لحام اللدائن المتصلبة بالحرارة (الترموستنك) عند نضجها ، لأن الترابط المستعرض لجزيئاتها سيكتمل ولا يمكن الحصول عليه مرة أخرى.

ان جميع الأسئلة الأساسية التالية يجب أن نجيب عليها خلال مرحلة التصميم للوصلة وذلك من أجل الحصول على الفهم الشامل لأداء وصلة اللحام:

- ماهي نوعية المادة أو المواد التي ستستخدم؟ وهل ستحتوي على حشوات؟
- ما هو الحجم الكلي للجزء وما هي السماحات المطلوبة؟
- ما هي المتطلبات النهائية للمنتج؟

○ هل المطلوب لحام إنشائي؟ إذا كان كذلك، فما هي القوى والأحمال التي يتطلب منه

مقاومتها؟

- هل تتطلب الوصلة منع التسرب؟ وإذا كان كذلك فما هو مقدار الضغط الذي ستعرض إليه؟
 - هل يتطلب المنتج أن يكون مظهره جميل وجذاب؟
 - هل وجود الزوائد في الوصلة داخلياً أو خارجياً مسموح به؟
 - هل هنالك متطلبات أخرى؟
- لهذه الأسباب هنالك عدة تقنيات يمكن بواسطتها إتمام عملية اللحام.

2-9 وصلات ربط اللدائن (Joining Plastics)

هنالك أربع طرائق أساسية تستخدم في وصل اللدائن وهي:

1. التثبيت الأسمنتي باستخدام المذيب.
2. الربط باستخدام مادة لاصقة.
3. اللحام الحراري أو فوق الصوتي.
4. التثبيت الميكانيكي.

هنالك مجموعة محددة فقط من المواد الثرموبلاستيكية التي يمكن سمنتتها باستخدام المذيب. حيث إن صلابة هذه الوصلة ستضاهي صلابة المادة الأصلية. ان جميع المواد اللدائنية يمكن وصلها مع المعادن والمواد الأخرى ومع بعضها البعض، باستخدام المواد اللاصقة. هنالك عدد كبير من المذيبات والمواد اللاصقة متوفرة، لكن خواص وصلة الربط ستعتمد على المادة المختارة.

ان جميع المواد الثرموبلاستيكية (باستثناء التي تكون قابلة اشتعالها شديدة) يمكن أن تتلين أو تنصهر من اجل إجراء عملية اللحام. ان المساحة المتلينة ربما ستضغط سوية أو تُسند، بهرس مسقط المساحة المتلينة، لتعشيق الجزئين المرتبطين. ربما تضاف للوصلات المنصهرة، حشوات بلاستيكية تندمج بالتبريد والتصليد. ان من أهم أدوات اللحام الشائعة هي:

1. الغاز أو الهواء الساخن.
2. العدد الساخنة.

3. التسخين بالحث (Induction Heating).

4. الاحتكاك الفوق الصوتي و طرق الحك (Rubbing) الأخرى.

يمكن ربط القطع اللدائنية باستخدام اللوالب، المسامير الملولبة، التشكيل بالطرق (Swaging) أو الطرق بحد المطرقة (Peening)، الكبس أو التثبيت بالانكماش (Shrink Fitting)..الخ. يجب أن نعمل على وضع بعض السماحات لاحتمالية ضعف و تركيز الإجهادات في تصميم اللدائن عند وجود وصلات الربط.

3-9 أساسيات لحام اللدائن Principle of Welding Plastics

إن أي عملية لحام لللدائن، ستشمل استخدام الطاقة، بصورة رئيسية ستكون بشكل حرارة، وذلك لصهر القطعتين المراد لحامهما. إن هذه الطريقة من عدة أوجه مماثلة إلى لحام المعادن باستثناء طبعاً إن درجة الحرارة المستخدمة هنا ستكون أقل بكثير.

إن تصاميم الوصلات للحام اللدائن ستكون مماثلة لتلك التي تستخدم في حالة لحام المعادن. فالوصلات يجب أن تكون نظيفة قبل عملية اللحام من أجل الحصول على لحام عالي الجودة. يجب أن تمتلك قضبان اللحام المألثة نفس التركيب للمواد اللدائنية المطلوب لحامها.

1-3-9 تصميم وصلات لحام اللدائن Plastic Weld Joint Design

عملياً جميع أنواع وصلات اللحام المعروفة في المعادن يمكن أن تستخدم في لحام

الثرموبلاستيك. وهذه تشمل:

- اللحام التناكبي
- اللحام الزاوي
- اللحام المتراكب
- لحام الزاوية
- لحام الحافة
- لحام خطي

لقد تم استخدام أنواعاً مختلفة للحام لوصل لدائن الثرموبلاستيك. الأطراف المائلة هي أحد الأمور الأساسية للحصول على لحام بجودة عالية. ولكن بعض أنواع الوصلات سوف لن تتطلب ذلك كالحرف (T) واللحام الزاوي.

فيما يلي استعراض لأهم طرائق اللحام المستخدمة لللدائن.

4-9 اللحام بالغاز الساخن Hot Gas Welding

وهي إحدى تقنيات اللحام للمواد اللدائنية الأكثر استخداماً في لحام لدائن الثرموبلاستيك و فيها يستفاد من حرارة تدفق لغاز ساخن يقوم بتليين كل من المادة المائلة (قضيبي اللحام) والأجزاء الملحومة، شكل (9-1). يُسخّن الغاز المضغوط (الذي قد يكون هواء، أو أكسجين، نيتروجين، ثاني أكسيد الكربون) باستخدام ملفات تسخين كهربائية يتم وضعها داخل بندقيّة اللحام. يتم توجيه الحرارة ببندقية اللحام مباشرة باتجاهي سطح الشغلة وقضيبي اللحام. حيث سيتم صهر حافتي القطعتين المراد وصلهما و قضيبي اللحام سوية وسيصبحان لزوجين. ستبدأ المادة

اللاحمة والمادة اللدائنية بالالتصاق نتيجة لضغط الحدوة (Shoe) وسيؤدي ذلك الى ترابط جزيئات البوليمرين بواسطة الترابط المستعرض عندما يبردان مكونين وصلة قوية. هنالك طريقتان أساسيتين للحصول على الحرارة من مشعل اللحام، أما يعمل بواسطة الغاز (مشعل غازي) أو عن طريق ملفات كهربائية (مشعل كهربائي).

لمشاعل اللحام الغازية الفوائد التالية:

1. خفيفة الوزن
2. تتطلب استبدالات قليلة
3. مستقلة عن القدرة المجهزة

إلا أن لها عيوباً كذلك وهي:

1. لا نستطيع استخدامها في المناطق المغلقة أو بالقرب من الأماكن التي لا تسمح بوجود اللهب.
 2. لا نستطيع استخدامها في بطانة الخزانات لأن الحرارة ستتغلغل خلال الغطاء الواقي مؤدية الى التسخين المفرط لللدائن عند الزوايا.
 3. كبيرة الحجم بالمقارنة مع المشاعل الكهربائية.
- تستخدم في الغالب في الأماكن التي لا تتوفر فيها الكهرباء. ان الغازات المستخدمة كوقود لتسخين الغاز في هذا النوع من المشاعل هي أما البروبان أو البيوتان.

1-4-9 لحام الغاز الساخن يدوياً – Manual Hot Gas Welding

ويتم بالخطوات التالية:

- 1) يُمسك قضيب اللحام بأحدى اليدين ويمسك مشعل اللحام باليد الثانية. عندما يكون المشعل جاهزاً للحام، يتم التأكد من درجة حرارة الغاز الساخن عند المقدمة بواسطة الترمومتر (Thermometer).
- يُقطع قضيب اللحام بزاوية 60° لتزويده بإسفين رقيق يمكن تسخينه بسهولة، مما سيسهل البدء بعملية اللحام. يوجه تدفق الهواء الساخن باتجاه السطح و يحافظ على المشعل بالحركة الفوقية ما بين قعر اللحام (الأخدود) وقضيب اللحام. عندما يصبح شكل كل من المادة الأساس والقضيب لامعين ولزجين، سيتمكن حينها البدء باللحام.
- 2) سيُلَيَّن قضيب اللحام تحت تأثير الحرارة وسيصبح ليناً ومرناً. سوف يُحني بزاوية 90° وسيبقى ممسوكاً عمودياً وسيحرك من اليمين إلى الشمال بمعدل 12.5 الى 25 سنتيمتر بالدقيقة. يجب أن نسلط ضغط منتظم على القضيب لكي يكون تدفقه بمعدل منتظم،

بينما يوجه منفث الهواء الساخن بحركة متبادلة ضد كل من قضيب اللحام والمادة الأساس.



شكل(9-1) طريقة اللحام اليدوية لللدائن بالغاز الساخن .

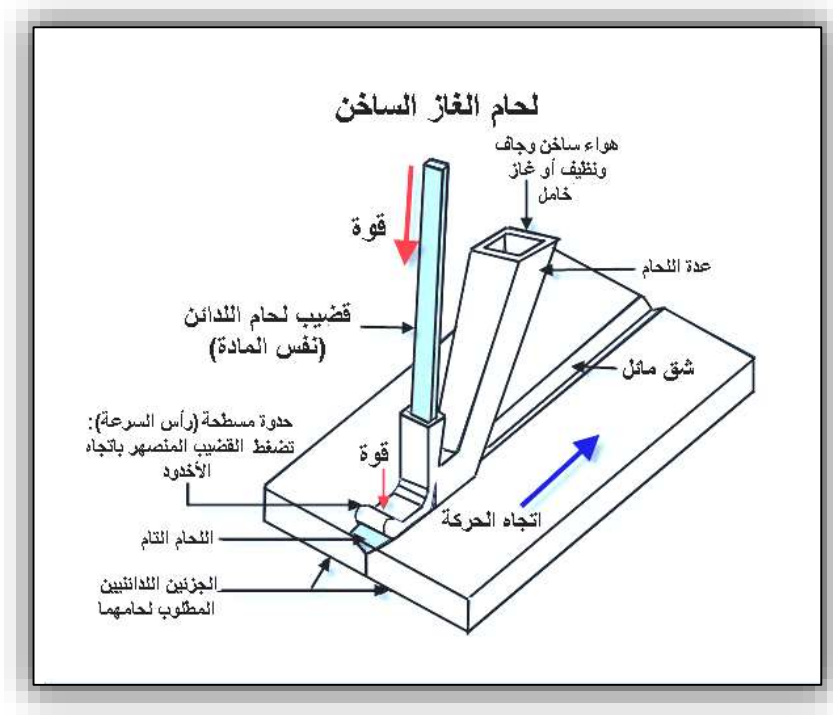
يتم ضغط قضيب اللحام ضد المادة الأساس، وسيعتمد الضغط المستخدم على قطر قضيب اللحام؛ الأقطار الصغيرة ستتطلب ضغطاً أقل من الأقطار الكبيرة. يمسك قضيب اللحام لأغلب أنواع اللدائن بزواوية 90° مع المادة الأساس. ولكن للبولي أثيلين، بولي بروبيلين... الخ، فإن الزاوية يجب أن تكون ما بين 45° الى 60° مع لفة التغذية. لإلغاء اللحام، نوقف جميع الحركة الأمامية ونطبق بشكل سريع الحرارة باتجاه خطوط التقاطع ما بين القضيب والمادة الأساس.

تتطلب هذه التقنية التي تستخدم يدوياً قدراً عالياً من المهارة لدى المشغل. بعض البوليمرات كالبولي أثيلين المنخفض الكثافة و العالي الكثافة سيتأكسدان عند ارتفاع درجة الحرارة لذلك يجب أن يتم لحامهما بغاز النيتروجين الساخن.

9-4-2 لحام الغاز الساخن ذو السرعة العالية والشبه المؤتمت

وتتم بحسب الخطوات التالية:

- 1) يوصل رأس اللحام ذو السرعة العالية باسطوانة الغاز الساخن ليُدَّ مشعل اللحام، شكل(9-2).
- 2) تقطع نهاية قضيب اللحام بزواوية 60° .
- 3) يُنظَّم معدل تدفق الهواء ونشغل القدرة الكهربائية المجهزة لمشعل اللحام.
- 4) يُمسك رأس اللحام لمسافة 12 mm من سطح المادة الأساس وسيتلين السطح، ويتم إدخال قضيب اللحام من خلال الشفة ومن ثم إلى المادة الأساس المتلينة.



شكل (9-2) طريقة اللحام الشبه مؤتمتة لللدائن بالغاز الساخن.

- (5) سيصبح قضيب اللحام ليناً.
- (6) ستسلط الحدوة المحددة أو الرأس عند المقدمة ضغطاً منتظماً على القضيب وستساعد على صقل المادة الخارجة من القضيب، لذلك سيتكون لحام بمظهر منظم.
- (7) يتم إيقاف اللحام بتحريك يده اللحام إلى الموقع الأعلى عمودياً، ومن ثم قطع نهاية قضيب اللحام.

تزدون هذه الطريقة للحام اللدائن بسرعة أعلى (حوالي 100 cm/min) من الطريقة اليدوية للحام.

أهم التطبيقات لهذه العملية هي:

- الحاويات
- خزانات حفظ المواد الكيماوية
- مجاري التهوية في المكيفات
- الأنابيب
- تصليح الشغلات

5-9 اللحام بالعدة الساخنة Heated Tool Welding

اللحام بالصفحة الساخنة أو بالعدة الساخنة، هي ربما أبسط طرائق تقنيات اللحام لللدائن وهي متعددة الاستخدامات. فاستخداماتها تتغير من الأجزاء الصغيرة ولغاية خطوط الأنابيب الكبيرة. وهي بصورة أساسية عملية يتم فيها تطبيق الحرارة على السطوح المراد وصلها بالتماس أو بالاقتراب من مصدر الحرارة الذي يكون عادة بشكل شريط تسخين كهربائي أو صفحة ساخنة أو كاوية حديدية... الخ. سيؤدي ذلك إلى تليين اللدائن فيتم إزالة المصدر الحراري ولحام الجزئين اللدائنيين بسرعة باللحام التناكبي أو اللحام الزاوي تحت تأثير ضغط قليل والانتظار حتى تبرد الوصلة.

ان العامل الأساسي في طريقة اللحام بالعدة الساخنة هو الفترة الزمنية ما بين إزالة المكونات الملحومة من العدة الساخنة وتسليط الضغط. ان هذه الفترة يجب ان تكون قصيرة قدر المستطاع (1 إلى 2 ثانية) لأن التأخير عند هذه النقطة سينتج عنه لحام سيء. ان المعدن المستخدم في صناعة العدة الساخنة يمكن ان يكون الصلب الكربوني المغلف بصفائح النيكل أو سبائك الألمنيوم. يجب ان تنظم درجة حرارة العدة الساخنة في حالة تجاوزها للمدى (200 – 370 °C) عندما تستخدم نظام التماس المباشر للتسخين بالتوصيل وسيطلب درجة حرارة (540°C) عندما تستخدم طريقة الفجوة للتسخين بالإشعاع.

1-5-9 Hot Plating Welding اللحام بالصفحة الساخنة

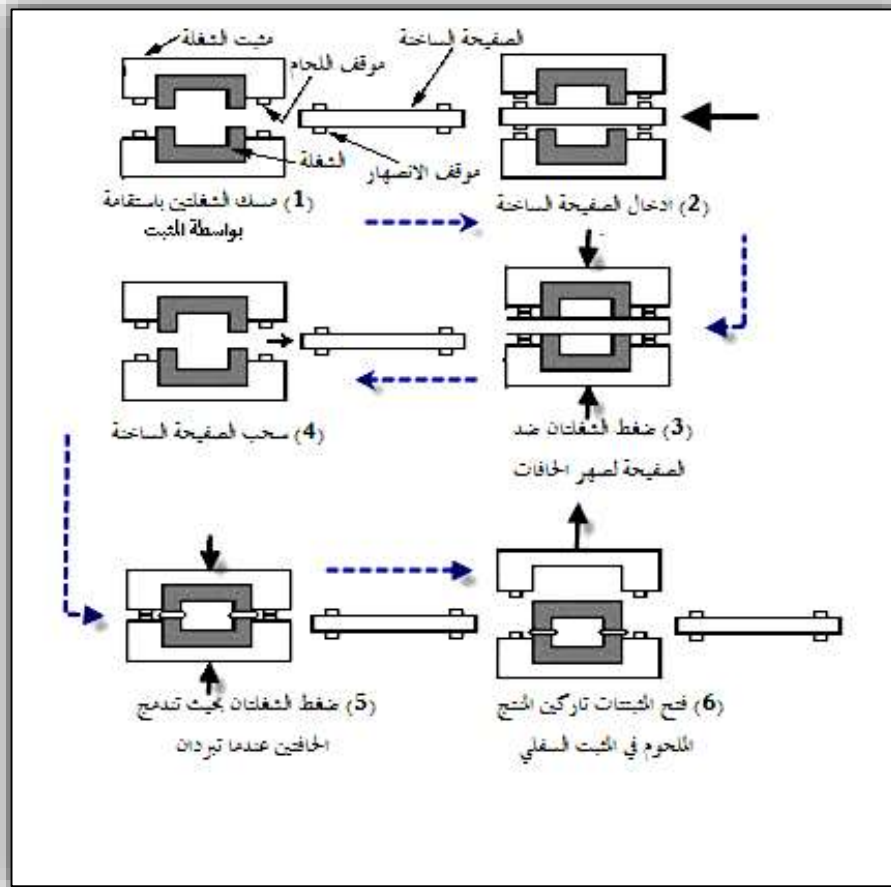
وهي إحدى أنواع طرائق اللحام بالعدة الساخنة حيث تستخدم فيها حرارة صفحة ساخنة توضع بين سطحي المادتين المراد وصلهما من اجل اللحام، شكل (9-3). حيث يتم ضغط الجزئين المراد وصلهما على الصفحة مؤدياً ذلك إلى تسخينهما وتليينهما. و بعد فترة زمنية معينة يتم إزالة الصفحة، ويقرب سطحي الجزئين المراد لحامهما إلى حد التلامس، ثم يضغط باتجاه بعضهما البعض حتى يبردان فيندمجان سوية. وسيحدث الترابط المستعرض بينهما عندما يبردان، مكونين وصلة قوية. تصنع هذه الصفائح عادةً من سبائك الألمنيوم. وتزود بملفات تسخين كهربائية تمكنها من التحكم بدرجة حرارة الصفحة. يتم طلاء سطح هذه الصفحة عادةً بالبولي تيريفلوروأثيلين (PTFE) وذلك لمنع التصاق اللدائن المنصهرة بها. أهم المتغيرات في هذه الطريقة هي درجة حرارة الصفحة، زمن التسخين، ضغط اللحام والفترة الزمنية للحام.

2-5-9 مميزات وعيوب تقنية اللحام بالعدة الساخنة

من أهم فوائد هذه الطريقة هي:

1. من السهل أتمتها؛
2. وصلات الربط الناتجة ذات جودة عالية؛

3. يمكن لحام القطع الكبيرة؛
 4. تزودنا بتوافق للسطوح الملحومة.
- أما أهم عيوب هذه الطريقة فهي:
1. دورة اللحام طويلة قد تصل من 10 ثانية للأجزاء الصغيرة ولغاية 60 دقيقة للأجزاء ذات الوصلات الكبيرة المساحة؛
 2. ستتكون كمية كبيرة نسبياً من الزوائد (Flash).



شكل (3-9) مراحل طريقة اللحام بالصفيحة الساخنة.

3-5-9 تطبيقات تقنية اللحام بالعدة الساخنة

يمكن استخدام هذه التقنية مع مجموعة واسعة من لدائن الترموبلاستيك وهي بصورة أساسية تستخدم للبولي أنيلين العالي الكثافة والمنخفض الكثافة، البي في سي ، البولي بروبيلين وفي مديات أقل للأكريليك. لا يصلح البي في سي الجاسيء (Rigid PVC) بصورة عامة للحام

بهذه الطريقة لأنه سيتحلل حرارياً عند تلامسه مع المعدن الساخن. أن أهم التطبيقات لهذه التقنية هي:

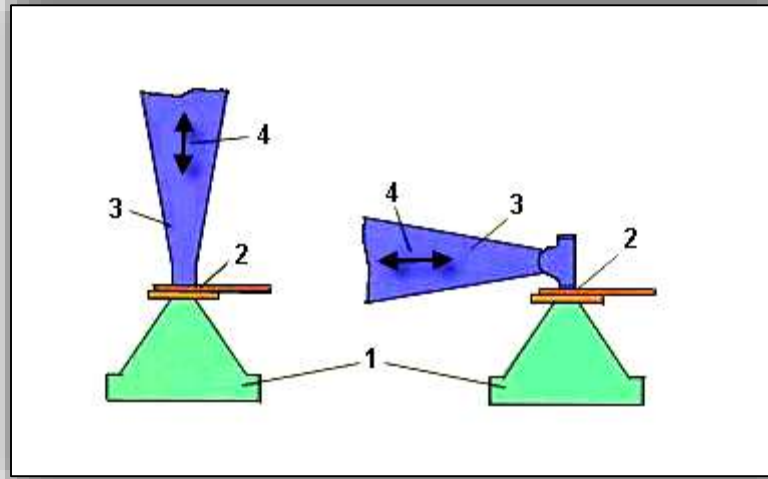
- الأجهزة المنزلية الكهربائية (غسالات الصحون، غسالات الملابس، المنظفات بالتفريغ)
- الأنابيب
- مكونات المركبات (الإضاءة، خزانات الوقود، البطاريات)

6-9 اللحام بالموجات فوق الصوتية Ultrasonic Welding

وتتضمن هذه الطريقة استخدام طاقة الترددات الصوتية العالية (الاهتزازات الميكانيكية) لتليين أو صهر وصلة اللدائن من نوع الترموبلاستيك، شكل (9-4). حيث يتم تجميع ومسك الأجزاء المراد وصلها تحت تأثير الضغط بين القرن والسندان ومن ثم يتم تعريضها إلى اهتزازات فوق صوتية وغالباً ما تكون عند تردد 20، 30 أو 40 kHz. ينتقل الإهتزاز فوق الصوتي إلى القطعتين المراد لحامهما بواسطة العدة المعدنية (القرن Horn ، قطب صوتي Sonotrode) مؤدياً ذلك إلى حدوث التذبذب المرن للمادة والاحتكاك ما بين الأجزاء المراد لحامها. سينتج عن ذلك اقتراب أكثر ما بين السطحين مع التسخين الموضعي الآني لمنطقة الإتصال. ستتصهر اللدائن في منطقة الاتصال، وسيحدث الترابط المستعرض في البوليمر، مكوناً وصلة قوية.

أن القابلية للحام الجيد لأي مكون ستعتمد على تصميم المعدات، الخواص الميكانيكية للمادة المراد لحامها وتصميم الجزء المراد لحامه. تستغرق دورة اللحام فوق الصوتي حوالي ثانية واحدة فقط. إنَّ الترددَ للاهتزازاتِ السمعية سيكون عادة في المدى من 20 إلى 70 kHz (عموماً 20-40 kHz). ان سعة الاهتزازات السمعية (Amplitude) هي حوالي (0.05 mm). يتحدد سمك الأجزاء الملحومة بحسب قدرة المولد فوق الصوتي. نتيجة للسرعة العالية لدورة اللحام هذه ، سيكون من السهل أتمتها، ولهذا تستخدم هذه التقنية بشكل واسع. من أجل ضمان نجاح اللحام لأي جزء، يجب الاهتمام بتصميم الأجزاء المراد وصلها وكذلك بالمشببات ولهذه الأسباب فان هذه التقنية هي الأفضل في حالة الإنتاج الكبير.

تستخدم هذه التقنية بصورة رئيسية في عمليات لحام اللدائن الغير متبلورة (بولي ستيرين PS ، أكريلونتريل-بيوتادين-ستيرين ABS).



(1) سندان؛ (2) الجزئين المراد لحامهما؛ (3) الاليتروود الصوتي؛ (4) التذبذب فوق الصوتي
شكل(9-4) طريقة لحام الموجات فوق الصوتية لللدائن.

9-6-1 مميزات وعيوب تقنية اللحام بالموجات فوق الصوتية

أن أهم فوائد هذه الطريقة فهي:

- ❖ دورة اللحام القصيرة الزمن
- ❖ سهولة الأتمتة ويمكن التحكم بها؛
- ❖ وصلاتها تكون زوائد قليلة؛
- ❖ استهلاكها للطاقة قليل

أما عيوب هذه الطريقة فهي:

- ❖ يمكن لحام الأجزاء الرقيقة السمك فقط؛
- ❖ تتطلب تصميم خاص للعدة المثبتة
- ❖ كلفة العدة عالية لذلك يفضل ان تستخدم في الإنتاج الكبير
- ❖ إن اللحام مُحَدَّد إلى المكونات الصغيرة بأطوال اللحام لا تتجاوزُ بضعة سنتيمترات

9-6-2 تطبيقات اللحام بالموجات فوق الصوتية

أن أهم التطبيقات لها:

- ☒ المعدات الطبية (المرشحات، أقنعة الوجه، الصمامات)
- ☒ أجزاء المركبات {متحسسات تدفق الهواء، المرشحات، الصمامات، مغلفات الأبواب، الإنارة، شكل(9-5) }
- ☒ أدوات كأجزاء في (المنظفات الفراغية، المكواة البخارية، غسالة الصحون)؛
- ☒ المعدات الكهربائية (المفاتيح، الموصلات)؛

✘ المكونات الاليكترونية والحاسوب ولعب الأطفال



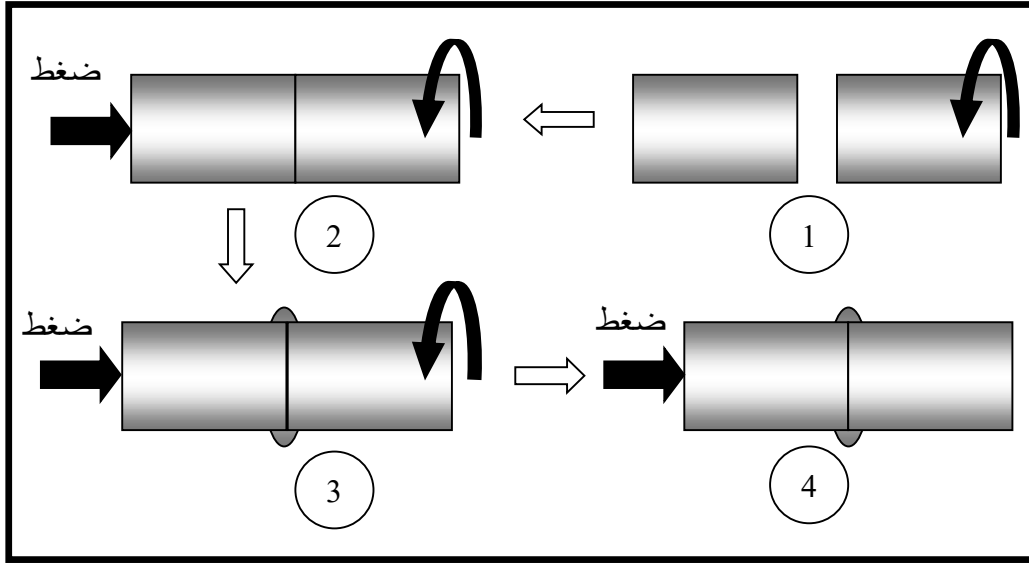
شكل (5-9) بعض استخدامات لحام الموجات فوق صوتية.

7-9 اللحام التدويمي (Spin Welding)

وهي إحدى عمليات لحام اللدائن (يطلق عليها اللحام الاحتكاكي أيضاً) التي مبادئها الأساسية مشابهة للطريقة المستخدمة للمعادن. في هذه الطريقة يقرب الجزئين الاسطوانيين الشكل المراد وصلهما من بعضهما البعض، وسيكون احدهما ثابت والأخر يدور بسرعة يمكن التحكم فيها، إلى حد التلامس باستخدام ضغط احتكاكي. سيؤدي الاحتكاك بين هذين الجزئين الأسطوانيين إلى تسخين منطقتي التلامس بينهما. وبعد فترة زمنية معينة سيوقف الدوران والمنطقة المصهورة للشغلتين ستندمجان سوية تحت تأثير ضغط محوري يسلط لغاية ان تبرد الوصلة.

ان أهم متغيرات اللحام لهذه الطريقة هي السرعة الدورانية ، الضغط الاحتكاكي، ضغط التشكيل، زمن اللحام والطول المنصهر.

وتستخدم هذه الطريقة لتصنيع قناني البخاخات، العوامات والأجزاء الدائرية الأخرى.



شكل (9-6) مخطط لمراحل طريقة اللحام التدويمي.

9-7-1 مميزات وعيوب تقنية اللحام التدويمي

أن أهم مميزات هذه الطريقة هي:

- ☒ إمكانية الاستعادة (Reproducibility)
- ☒ يمكن لحام الأجزاء الكبيرة ؛
- ☒ تعتبر طريقة بسيطة ووصلات اللحام فيها تكون ذو جودة عالية ؛
- ☒ يمكن لحام البوليمرات المتأكسدة ؛

أما عيوبها فهي:

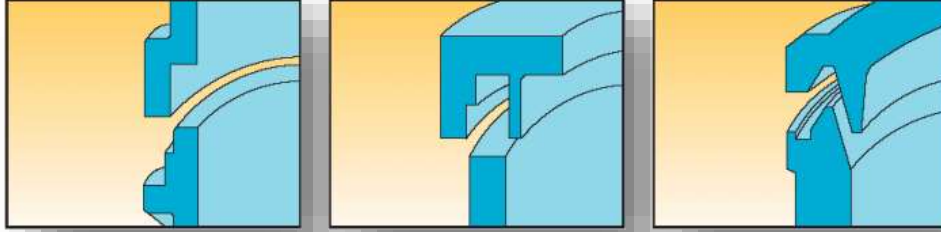
- ☒ يجب ان يكون مقطع الجزء الملحوم دائرياً على الأقل لجزء واحد من الأجزاء الملحومة؛
- ☒ تتطلب أدنى جساءة ممكنة للأجزاء الملحومة

9-7-2 متطلبات التصميم لوصلات اللحام التدويمي

أما بالنسبة لمتطلبات التصميم لوصلات هذا النوع من اللحام فيجب ان:

- ❖ يجب ان تمتلك وصلة اللحام التدويمي الجودة مساحة لحام مساوية أو أكبر من سمكي جدار الجزئين المراد لحامه.

❖ يجب ان تكون الوصلتين مصطفيتين باستقامة (Alignment) كافية قبل لحامهما، شكل(9-7).



وصلة قسبية

وصلة مشفهة قسبية

وصلة لسان وأخدود

شكل(9-7) تصاميم مختلفة من وصلات في اللحام التدويمي.

8-9 اللحام الاهتزازي (Vibration Welding)

وهي إحدى طرائق لحام اللدائن التي يطلق عليها كذلك اللحام الاحتكاكي الخطي (Linear Friction Welding) حيث فيها يتم تعريض الجزئين المراد لحامهما إلى الاحتكاك تحت تأثير الإهتزاز بسعة وتردد محددين. سيُخك الجزئين المراد لحامهما تحت تأثير ضغط مؤدياً ذلك إلى تولد الحرارة. ستؤدي هذه الحرارة إلى انصهار البوليمرين عند منطقة الاتصال. سيندمج الجزئين سوياً وبعد فترة معينة من الزمن ويوقف الاهتزاز. ستعمل جزيئات البوليمرين على نشوء الترابط المستعرض بينهما عندما تبردان سوياً، مكونتين وصلة قوية. ان هذه الطريقة مشابهة لطريقة اللحام التدويمي باستثناء ان الحركة هنا خطية وليست دورانية.

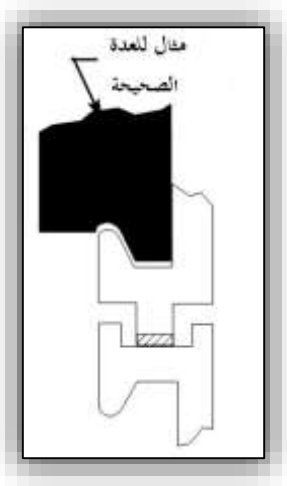
ان زمن دورة اللحام الاهتزازي سيكون قصير جداً (أجزاء من الألف من الثانية). ان تردد الاهتزازات الصوتية هي في المدى (100-500 Hz) والشائع (100-240 Hz). أما سعة الاهتزازات فهي حوالي (0.5-5 mm).

1-8-9 إعتبارات التصميم الرئيسية

الملاحظات التالية يجب أن نعرفها عند تصميم الأجزاء للحام الأهتزازي:

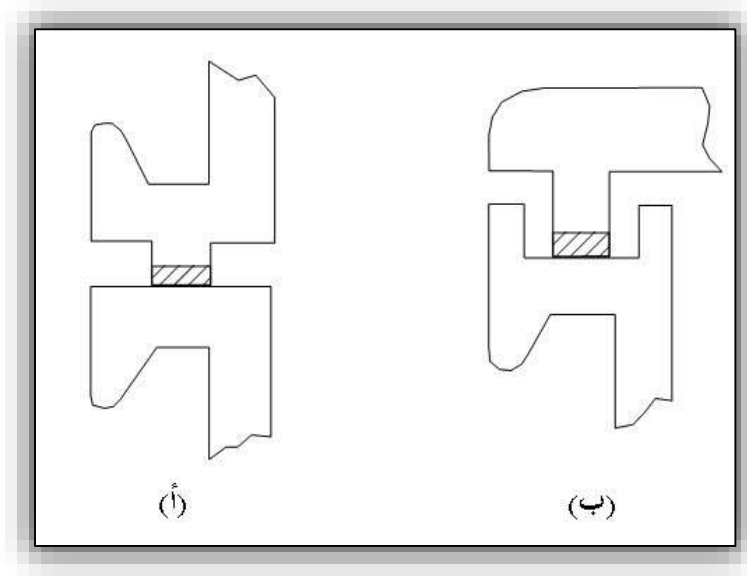
- ☒ يجب ان يكون هنالك خلوص كافي بين الجزئين للحركة الاهتزازية (2 mm) الكلي، (±1 mm) للانحراف عن الخط المركزي.

- ✘ خرزة اللحام أو اللسان يجب ان يساويان إلى سمك الجدار الاسمي للمواد التي بدون حشوات، و يجب ان يكونان (1.25) مرة بقدر سمك الجدار الاسمي للمواد التي تحتوي على الحشوات، اعتماداً على متطلبات صلابة الوصلة.
- ✘ يجب ان يكون سمك الجدار للجزء الملحوم ذو صلابة كافية لمنع التقوس أو الانحناء خلال عملية اللحام. في العديد من الحالات ربما يتطلب هنا إضافة الشفاه (Flanges). الشكل (8-9) يبين تصميم اللسان وأخدود مع مفتاح مقبضي، سيكون ذلك مثالياً لوصلة اللحام الاهتزازي. انه يمسك بأمان الشفة في العدة، وسيجعل الجزئين على استقامة واحدة قبل اللحام، مسلطاً قوة اللحام مباشرةً فوق مساحة اللحام وسيخفي الزوائد الخارجية والداخلية. لا يتطلب ان يكون مفتاح القبضة مستمراً على طول الوصلة.



شكل (8-9) وصلة اللسان والأخدود مع مفتاح مقبضي.

- الشكل (9-9-أ) يبين شفة مع مفتاح مقبضي، وتمتلك جميع ميزات الوصلة التي في الشكل (9-9-8) باستثناء إنها لا يوجد فيها زوائد. يمكن استخدام الشفاه الضيقة وتركيبها سوف لن يكون حرجاً.



شكل(9-9): (أ) وصلة مشفهة مع مفتاح مقبضي؛ (ب) لسان وأخدود مختلفين.

الشكل(9-9-ب) يبين وصلة لسان وأخدود مختلفين ويستخدمان عندما يراد لحام غطاء مسطح أو غير عميق.

يمكن لحام معظم البوليمرات (الغير متبلورة، الشبه متبلورة والمتبلورة) والمنتجة بتقنيات تشكيل مختلفة (التشكيل الحراري، البثق، القولبة بالحقن، القولبة بالنفخ، القولبة الانتقالية) بتقنية اللحام الاهتزازي.

لقد استخدم اللحام الاهتزازي بصناعة المركبات والأدوات المنزلية.

2-8-9 مميزات وعيوب تقنية اللحام الاهتزازي

ان أهم مميزات هذه الطريقة هي:

☒ إمكانية لحام البوليمرات المتأكسدة؛

☒ سهولة الأتمتة

☒ إنتاجيتها كبيرة؛

☒ يمكن لحام الوصلات الخطية في الأجزاء الكبيرة والمعقدة؛

أما عيوبها فهي:

☒ معداتها نسبياً مرتفعة الثمن؛

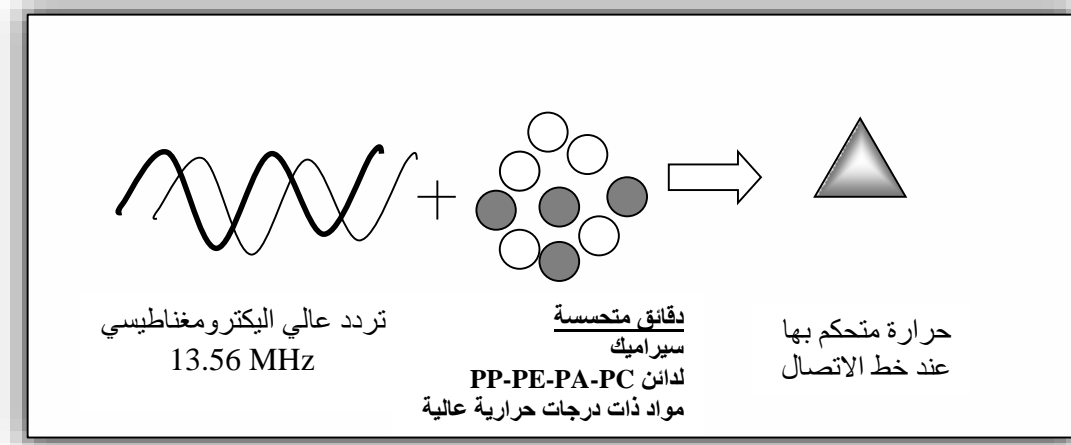
☒ تتطلب أدنى جساءة ممكنة للأجزاء الملحومة

9-9 اللحام الأليكترومغناطيسي Electromagnetic Welding

تستخدم هذه الطريقة طاقة تردد عالية مصحوبة بمادة متحسسة أليكترومغناطيسية لتجهز

الحرارة بدقة إلى خط الوصلة للحصول على لحام فعلي لجميع اللدائن من نوع الثرموبلاستيك.

يمكن بهذه الطريقة كذلك لحام المواد الغير متماثلة، فيمكن لحام المواد المرنة بالمواد الجاسئة. انها كذلك تقاوم أو تتحمل أغلب متطلبات درجات الحرارة، ومقاومة للتسريب وللضغط، بالإضافة إلى تزويدها لمتطلبات الجمال للوصلة. ان هذه التقنية تزودنا بمتطلبات تصميم المنتجات الإبداعية. ان الحرارة التي يمكن التنبأ بها (Predictable Heating) تستخدم التفاعل بين قوة المجال للتردد العالي الاليكترومغناطيسي والمادة المتحسسة (Susceptors) لتوليد الحرارة كما مبين في الشكل(9-10).



شكل(9-10) توليد الحرارة بطريقة اللحام الاليكترومغناطيسي

الجزء التالي (شكل 9-11) سيوضح مراحل (قبل - خلال - بعد) تكوين وصلة لحام ناجحة خلال تصميم وصلة شائعة (لسان وأخدود). هذا النوع من التصميم للوصلات يزودنا بأفضل النتائج، خاصة عندما يكون منع التسرب وتحمل الضغط العالي أحد المتطلبات للمنتج.

(1) قبل اللحام

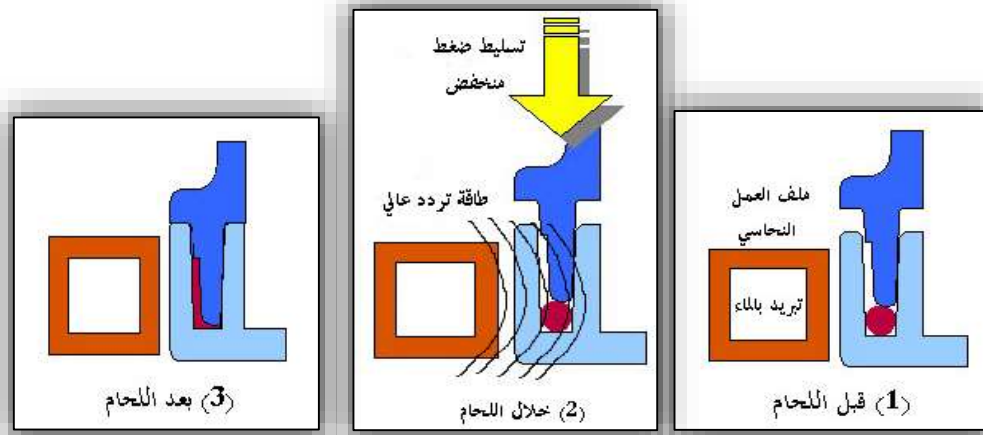
توضع المادة الراتنجية المُشكلة مُسبقاً داخل الوصلة. ويجلب الجزئين المراد لحامهما ويوضعا بالقرب من المثبت المحتوي على الملف العامل النحاسي والذي سيكون الخط الهندسي للحام. هذه المرحلة من السهل أتمتها أو تشغيلها ميكانيكياً.

(2) خلال اللحام

عندها سيتم تنشيط الملف العامل الذي سيسخن ويصهر المادة الراتنجية مؤدياً ذلك إلى انصهار السطحين المتجاورين للجزئين. ستستهلك الطاقة فقط خلال دورة التسخين الحقيقية والتي هي في الغالب ما بين 1 الى 30 ثانية. وتسلط قوة تثبيت قليلة خلال المثبت المصمم خصيصاً للسماح بانتقال كافي لدرجة الانصهار للمادة.

(3) بعد اللحام

سيماً الراتنج الفجوة المصممة للوصلة. ستلحم العملية الجزئين، ناتجة وصلة دائمة بين البوليمرين. نلاحظ ان مساحة مقطع الوصلة المكبوسة سيكون صغير بالمقارنة مع طرائق الاحتكاك والحرارة للأجزاء المُجمعة والتي عادة ما تتطلب مساحات عرض و ١ أو مصائد للزوائد. نلاحظ ان هذه الطريقة هي طريقة لا- تلامسية، وغير عنيفة للتجميع وستكون ناعمة على الأجزاء المراد لحامها.

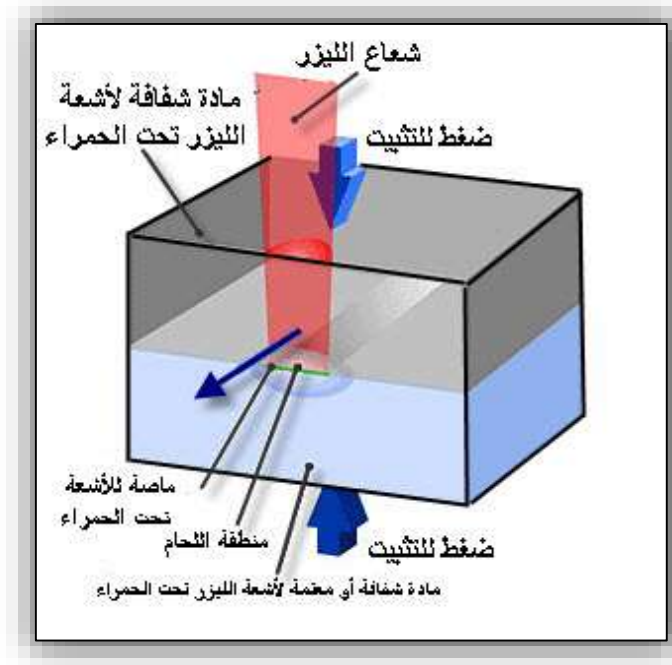


شكل(9-11) مراحل وصلة اللحام الاليكترومغناطيسي.

10-9 اللحام بالليزر Laser Welding

ان هذه الطريقة مناسبة للأفلام والصفائح ومقولات الترموبلاستيك. حيث أنها تستخدم شعاع الليزر لصهر اللدائن في منطقة الوصل. سيولد الليزر شعاعاً مركزاً من الطاقة المُشعة (عادة ما تكون في المساحة تحت الحمراء للطياف الأليكترومغناطيسي) والذي يُركّز باتجاه المواد المراد وصلها. ستستثير هذه ذبذبات الرنين في الجزئيات، مولدة للحرارة في المناطق المحيطة. تتطلب هذه الطريقة ان يكون أحد الأجزاء المراد وصلها قابلة لنقل (Transmissive) أشعة الليزر والأخر ممتصة (Absorptive) لهذه الأشعة. حيث يتم وضع الجزئين المراد وصلهما تحت تأثير الضغط بينما يتحرك شعاع الليزر على طول الوصلة، شكل(9-12). تعتبر هذه التقنية من تقنيات الإنتاج الكبير مع الفائدة بعدم توليد أي اهتزازات وسيكون فيها زوائد قليلة، مما سيقبل من احتمالية التشوه أو التكسر للمكونات الملحومة. ان هذه الطريقة لا يحدث فيها تماس أي إنها نظيفة و صحية. يستخدم ليزر صمام ثنائي شبه موصل (Semiconductor Diode Laser) عادة في لحام اللدائن. الطول أموجي له يكون في المدى (980-808 mm) ويمكن ان يستخدم لوصل مختلف

تركيبات اللدائن. القدرة المطلوبة تكون في المدى من أقل من 1 W ولغاية 100 W بالاعتماد على نوع المادة.



شكل (9-12) مخطط لتقنية اللحام بالليزر لللدائن.

يمكن انجاز اللحام بالليزر في ضربة واحدة أو بطريقة مستمرة، إلا إن المواد المراد وصلها تتطلب التثبيت كذلك. ان سرعة عملية اللحام ستعتمد على قابلية الامتصاص (Absorption) للمادة اللدائنية. حيث سيمر الشعاع خلال الجزء الأول وسيُمتص خلال الجزء الثاني أو سيغلفهما لتوليد حرارة كافية لتلين السطوح البينية مكوناً وصلة لحام دائمة.

لأنظمة الليزر الثنائية الصمام المميزات التالية:

- أنظف من الروابط اللاصقة؛
- لا وجود للأبخرة أو السوائل المؤثرة على الإنهاء السطحي لللدائن؛
- غير استهلاكية؛
- لا يحدث انسدادات في المنافث
- الطاقة الإنتاجية عالية
- مستوى عالي من التحكم بالعملية.

أسئلة الفصل

1. ما هي المميزات التي يمتلكها لحم اللدائن بالمقارنة مع الوصلات؟
 2. ما هي الأسئلة الأساسية التالية يجب أن نجيب عليها خلال مرحلة التصميم للوصلة وذلك من أجل الحصول على الفهم الشامل لأداء وصلة اللحم؟
 3. كيف تجرى طريقة اللحم بالغاز الساخن لللدائن؟ ما هي فوائد هذه الطريقة وما عيوبها؟
 4. بين خطوات لحم الغاز الساخن ذو السرعة العالية والشبه المؤتمت؟
 5. لماذا يعتبر اللحم بالصفحة الساخنة أو بالعدة الساخنة، ربما أبسط طرائق تقنيات اللحم لللدائن؟
 6. ما هو العامل المتغير الأساسي في طريقة اللحم بالعدة الساخنة؟ ما هي مميزات هذه الطريقة؟ وما هي عيوبها؟
 7. صف طريقة اللحم بالصفحة الساخنة لللدائن؟
 8. كيف يتم اللحم بالموجات فوق الصوتية في اللدائن؟ على ماذا تعتمد القابلية اللحم الجيد لأي مكون؟
 9. ما هي مميزات وعيوب تقنية اللحم بالموجات فوق الصوتية؟
 10. كيف تجرى عملية اللحم التدويمي في اللدائن؟ وما هي أهم متغيرات اللحم لهذه الطريقة؟
 11. بين ما هي متطلبات التصميم لوصلات اللحم التدويمي؟
 12. تعتبر طريقة اللحم الاهتزازي إحدى طرائق لحم اللدائن التي يطلق عليها كذلك اللحم الاحتكاكي الخطي؟ كيف يتم انجاز اللحم بهذه الطريقة وما هي مميزات وعيوب هذه الطريقة؟
 13. ما هي طريقة اللحم الأليكترومغناطيسي لللدائن؟ وما هي عيوبها ومميزاتها؟
 14. علل ما يأتي:
1. تعتبر طريقة لحم الليزر من الطرائق النظيفة والصحية.
 2. لا يمكن لحم اللدائن من نوع الثرموستنك بأي طريقة لحم.
 3. تتطلب تقنية لحم الغاز الساخن التي تستخدم يدوياً قدرأً عالياً من المهارة لدى المشغل.
 4. ان الحرارة المطلوبة لإجراء عملية اللحم لللدائن الثرموبلاستيك هي أقل بكثير عن الحرارة المستخدمة في لحم المعادن.

الفصل العاشر:

اللدائن و البيئة

Plastics & Environment

1-10 مقدمة

يبلغ الإنتاج السنوي العالمي للبوليمرات (اللدائن) قرابة 100 مليون طن. ويتم استخدام 8% من الإنتاج الكلي للبترول في صناعة اللدائن (كمواد خام وكمصدر للطاقة). تمتلك غالبية المنتجات اللدائنية دورة حياة قصيرة (أقل من سنة)، لذلك فإن النفايات اللدائنية تؤلف قسم كبير نسبياً من وزن النفايات الكلية فتبلغ حوالي 10% (26% كنسبة حجمية)، تبلغ النفايات السنوية لللدائن في الولايات المتحدة الأمريكية حوالي 15 مليون طن، وفي بريطانيا حوالي 3 مليون طناً. عندما استعملت اللدائن كمادة للتغليف والتعبئة بشكل كبير بواسطة المستهلكين، تولدت المزيد من المخلفات اللدائنية، شكل (1-10). ونظراً لكون أغلبية المواد اللدائنية غير قابلة للتحلل بسرعة، فقد ساهمت هذه المخلفات بطريقة ملموسة في تلويث البيئة.

لذلك انبثقت فكرة إعادة تصنيع اللدائن باعتبارها إحدى الطرائق للتصدي لمشكلة المخلفات اللدائنية. فنشأت الصناعات التي تنتج أو تستعمل كميات كبيرة من اللدائن عن طريق إعادة استعمال مخلفاتها. وهذه الصناعات غالباً ما تقوم بتنظيف وفصل أنواع اللدائن المختلفة قبل عملية إعادة الاستخدام. حيث تقوم هذه المصانع عادةً بإعادة استعمال اللدائن الحرارية (الثرمو بلاستيك) وذلك بإعادة صهره وتشكيله في صورة منتجات جديدة. أما اللدائن المتصلبة حرارياً (الثرموستاتيك) فيتم طحنها على شكل مساحيق ناعمة أو يتم تمزيقها ببعض الأحيان وتستعمل المساحيق كالمئات وتستعمل القطع الصغيرة كعوازل في منتجات كالأغطية وأكياس النوم.

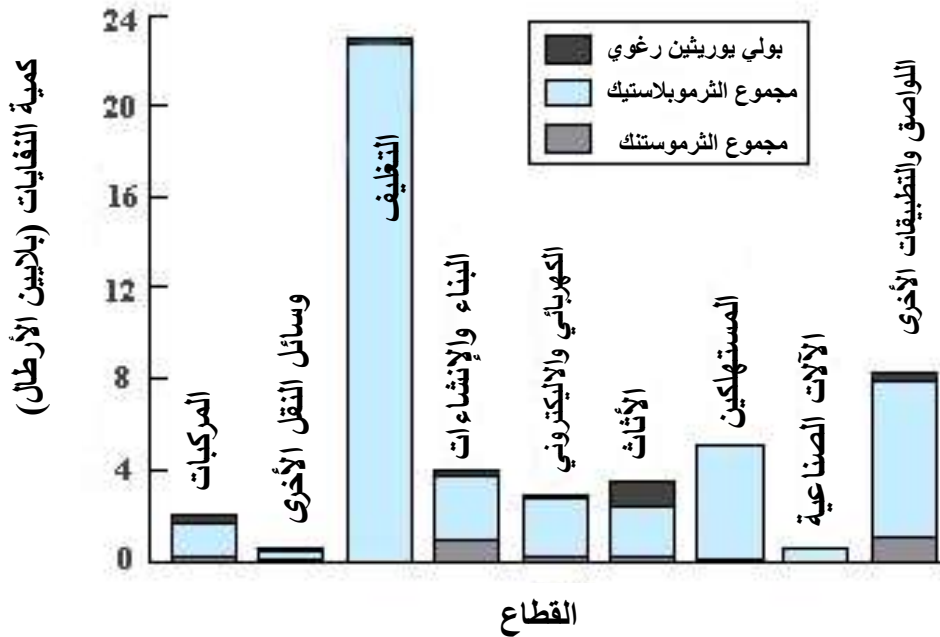
لقد تنبّهت بعض البلدان في عام 1980 ف، الى ان إعادة الاستعمال ستساعد المستهلكين بالتخلص من مخلفات اللدائن، حيث طالبت هذه البلدان من المواطنين بفصل عناصر معينة من اللدائن كالبولي يستر، عن مخلفات المواد الأخرى وبذلك سيتمكن إعادة استعماله مثل مخلفات الصناعات الأخرى.

هنالك بعض البلدان الأخرى التي لم تفصل اللدائن بل عوضاً عن ذلك قامت بحرق خليط النفايات التي تجمعها البلديات. وتمت الاستفادة من الطاقة الحرارية الناتجة عن طريق تحويلها

الى طاقة كهربائية. إلا أن هذه العملية تتطلب مواعد معقدة لإزالة الغازات الحمضية الناتجة عن حرق الفينيل.

وهناك طريقة أخرى للتخلص من الفضلات اللدائن وذلك عن طريق تصميم أنواع من اللدائن التي يمكن ان تتحلل بالطبيعة وبمرور الزمن. ففي السبعينات من القرن العشرين، أكتشف علماء الكيمياء نوعاً من اللدائن القابلة للتحلل البيولوجي بحيث يمكن تحلله بواسطة الكائنات الدقيقة. حيث ان هذه المنتجات المصنوعة من هذه اللدائن ستفصل جزيئات النشويات أو السليلوز من سلاسل البوليمر، ومن ثم ستنقش هذه الكائنات الدقيقة على النشويات وتستنفذها فتتبدد هذه المنتجات. كما توصل بعض العلماء الى نوع من اللدائن الذي يمكن تفككه عند تعريضه الى الضوء لفترة طويلة نتيجة للتحلل الضوئي. والعنصر الفعال في هذه اللدائن هو وجود مادة كيميائية يمكن ان تتفكك بفعل التعرض لأشعة الشمس.

النفائات اللدائنية في عام 2000 ف



شكل (10-1) كميات النفائات اللدائنية في عام 2000 ف.

في منتصف الثمانينات بدأ المصنعون في استعمال اللدائن القابلة للتحلل في صناعة أكياس القمامة وأوعية على شكل مواد رغوية ومنتجات أخرى يسهل التخلص منها. ولكنهم واجهوا نقداً حاداً من قبل جمعيات حماية البيئة فضلاً عن بعض القائمين على صناعة اللدائن. ويسوق هؤلاء النقاد الحجة في عدم إمكانية التخلص من بقايا المكونات اللدائنية القابلة للتحلل مهما تحكنا في الظروف، لذلك فان هذه البقايا سوف لن تتحلل بدفنها في باطن الأرض. ولقد أشاروا

إلى ان المواد المضافة لللدائن لتمكنها من التحلل ستجعل هذه اللدائن غير قابلة لإعادة الاستعمال.

نستنتج من ذلك بأن هنالك مشكلتين رئيسيتين في التعامل مع النفايات اللدائنية:

- المواد الخام المستخدمة لإنتاج اللدائن (النَّظَط الخام) هي مواد غير قابلة للتجديد؛
- معظم المواد اللدائنية هي غير قابلة للتحلل الحيوي (Bio-Degradable). فالأرض ممتلئة بالنفايات اللدائنية وسوف لن تتحلل هذه المواد لمئات السنين.

2-10 الحوافز لمعالجة النفايات اللدائنية


من أهم الحوافز التي تدفعنا للاهتمام بمعالجة المخلفات اللدائنية هي:


1. ان تكلفة المواد الخام لللدائن المُدَوَّرَة (Recycled Plastics) هي أقل من المواد الخام الأصلية (الغير مدورة)؛
2. كلفة عمال التدوير هي أقل من كلفة الإنتاج الأولي؛
3. يمكن الاستفادة من اللدائن كمصدر للطاقة؛
4. القوانين والتشريعات الحكومية لسياسة تدوير المخلفات.


3-10 أنواع مخلفات الراتنجات اللدائنية


(Types of Plastic Resins Waste)

تُقسَم جميع اللدائن المُدَوَّرَة الى سبعة مجاميع وذلك بحسب نوع راتنج اللدائن:

Polyethylene Terephthalate (PET or PETE) بولي أثيلين تيريفثاليت  ويستخدم في صناعة قناني المشروبات الخفيفة، صواني وجبة الطعام الجاهزة للفرن ، قناني صلصة السلطة.

High Density Polyethylene (HDPE) بولي أثيلين عالي الكثافة  ويستخدم في صناعة قناني الحليب والعصير، لعب الأطفال، أكياس البقالين.

Polyvinyl Chloride (PVC) بولي فينيل كلورايد (بي في سي)  حافظات الطعام الشفافة، قناني المياه المعدنية وحاويات الشامبو، صواني الغذاء.

Low Density Polyethylene (LDPE) بولي أثيلين منخفض الكثافة 

ويستخدم في صناعة أكياس البقالين، بطانه الصناديق، صناديق الخبز، أكياس الغذاء المجمد.

بولي بروبيلين (PP) Polypropylene



ويستخدم في صناعة صواني المايكروويف، حاويات الصلصات، أنابيب السمن الصناعي النباتي (المارجرين)، حاويات اللبن والقناني الطبية.

بولي ستيرين (PS) Polystyrene



ويستخدم في صناعة حافظات الأقراص المدمجة، الصواني الرغوية التي تستعمل للحوم والأسماك، أكواب القهوة، صناديق الساندويتشات والهمبرجر، وصواني الكافيتيريا.

أنواع اللدائن الأخرى



أن هذه العلامات الموجودة الآن على بعض المنتجات اللدائنية ستسهل من عملية فرز الأنواع المختلفة لللدائن والتي ستسهل من عملية إعادة تدويرها.

4-10 تجميع المخلفات اللدائنية (Collection of Plastic Waste)

ان أهم مصادر اللدائن المدوّرة هي:

- المخلفات الصناعية؛
- المخلفات الزراعية (الحاويات، الأنابيب، الصفائح)؛
- مخلفات الفنادق والمطاعم والأسواق؛
- نفايات البلدية (النفايات اللدائنية المبعثرة المجمعّة من الشوارع، المنتزهات، السواحل)؛
- النفايات المنزلية (أنواع المخلفات المجمعّة من قبل البلدية من المنازل).

فمن أجل إجراء عملية التدوير يجب أن تُغسل المخلفات اللدائنية وتفرز بحسب ترميز النظام (Coding System).

10-5 طرق معالجة المخلفات اللدائنية

على الرغم من ان هذه المواد تدخل تحت صنف المركبات العضوية إلا أن التخلص منها بالطرائق التقليدية سيسبب مشاكل لا حصر لها.

تنقسم اللدائن الى أنواع عديدة ويمكن اختصارها الى نوعين رئيسيين هما اللدائن التي تكون على شكل مواد صلبة (Hard Plastic) و التي تكون على شكل أفلام رقيقة (Thin Film Plastic). ويتم غسل اللدائن قبل إعادة التدوير بمادة الصودا الكاوية المضاف إليها الماء الساخن. وبعد ذلك يتم تكسير اللدائن الصلبة وإعادة استخدامه في صنع مشابك الغسيل، والشماعات، وخرائطيم الكهرياء اللدائنية، ولا ينصح باستخدام مخلفات اللدائن في إنتاج منتجات تتفاعل مع المواد الغذائية. أما الأفلام الرقيقة من اللدائن فيتم إعادة بلورتها في آلات البلورة. ان المفهوم الحديث لمعالجة النفايات بشكل عام يتضمن مجموعة من البدائل أهمها:

10-5-1 تقليل الحجم (Size Reduction)

ان المقصود بتقليل الحجم هو تقليل المواد الخام المستعملة، وبالتالي تقليل المخلفات، ويتم ذلك عن طريق:

1. أما باستخدام مواد خام أقل.
2. أو باستخدام مواد خام تنتج مخلفات أقل.
3. أو عن طريق الحد من المواد المستخدمة في عمليات التعبئة والتغليف، مثل: اللدائن والورق والمعادن، وهذا ما يستدعي وعياً بيئياً من كل من المستثمر والمنتج؛ فمثلاً في الولايات المتحدة الأمريكية التزم الكثير من منتجي الصابون السائل بزيادة تركيزه؛ حتى يتم تعبئته بعبوات أصغر، أو إنتاج معجون أسنان بدون عبوته الكرتونية الخارجية، وهذا ما يطلق عليه بتقليل الفضلات (Waste Minimization).

10-5-2 التدوير (Recycling)

تعتبر طريقة التدوير (Recycling) للمخلفات اللدائنية من أهم الطرائق المستخدمة للتخلص منها بشرط ان لا تكون هذه المواد ملوثة أو كانت قد استعملت من قبل في تعبئة السموم والمواد الكيماوية الخطرة أو المعادن الثقيلة. كما ينصح بعدم استعمال نواتج عملية إعادة التصنيع في تعبئة المواد الغذائية والمشروبات. كما تعتبر عملية تجميعها في مخازن خاصة بعد عملية التقليل من حجمها وإعادة تصنيعها من أنجح الطرائق للتخلص منها.

التدوير هي عملية إعادة تصنيع واستخدام المخلفات، سواءً كانت منزلية أم صناعية أم زراعية، وذلك لتقليل تأثير هذه المخلفات وتراكمها على البيئة. وتتم هذه العملية عن طريق تصنيف وفصل المخلفات على أساس المواد الخام الموجودة بها ثم إعادة تصنيع كل مادة على

حدة بعد غسلها. ويتم غسل اللدائن بمادة الصودا الكاوية أو بالصابون السائل المركز مضافاً إليهما الماء الساخن، حيث تتطلب إعادة التدوير ان تكون المادة اللدائنية خالية من الدهون والزيوت والشوائب.

لقد بدأت فكرة إعادة التدوير أثناء الحرب العالمية الأولى والثانية، حيث كانت الدول تعاني من النقص الشديد في بعض المواد الأساسية كالمطاط، مما دفعها الى تجميع تلك المواد من المخلفات لغرض إعادة استخدامها. وبعد سنوات أصبحت عملية التدوير من أهم أساليب الإدارة المتبعة في التخلص من النفايات؛ وذلك للفوائد العديدة لهذه العملية.

فلسنوات عديدة كانت إعادة التدوير المباشر عن طريق منتجي مواد المخلفات (الخردة) هي الشكل الأساسي لإعادة التدوير، ولكن مع بداية التسعينيات بدأ التركيز على إعادة التدوير الغير مباشر أي تصنيع مواد المخلفات لإنتاج منتجات أخرى تعتمد على نفس المادة الخام مثل: إعادة تدوير الزجاج والورق واللدائن والألمنيوم وغيرها من المواد التي يتم الآن إعادة تدويرها. لقد وجد رجال الصناعة انه إذا تم اخذ برامج إعادة التدوير بمأخذ الجد، فانه من الممكن ان تساعد في تخفيض تكلفة المواد الخام وتكلفة التشغيل، كما يمكن ان تحسن من صورتهم كمهتمين دائمين بالتلوث البيئي.

وفيما يلي بعض الحلول لتسهيل عملية إعادة التدوير وتتضمن:

1. تنظيم عملية فرز النفايات والقمامة في الأحياء السكنية، والمناطق الصناعية والأسواق، وتخصيص أماكن فيها للمواد اللدائنية.
2. وضع علامة للدلالة على إمكانية تدوير المنتج، شكل (10-2).
3. تصنيف أنواع البوليمرات بوضع رقم خاص يدل على نوع البوليمر المستخدم في صناعة المنتج، وذلك بوضع الرقم داخل علامة إعادة التدوير وسيساعد ذلك على فرزها وتسهيل التعامل معها في المصانع المتخصصة بالتدوير أو إعادة التصنيع، شكل (10-3).



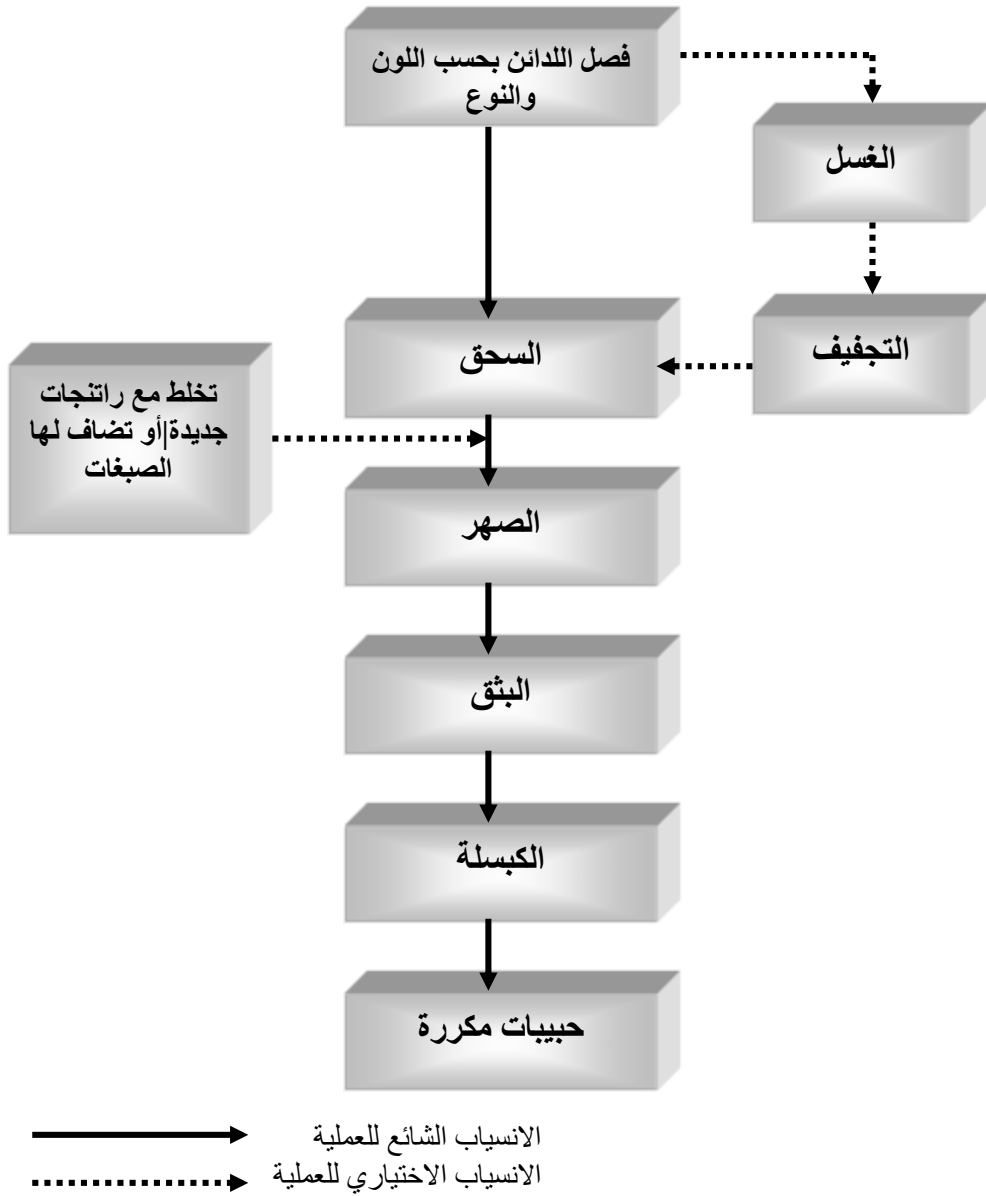
شكل (10-2) منتج فيه علامة تدل على إمكانية تدويره.

وتساهم طريقة إعادة التدوير، شكل (10-3) في المحافظة على البيئة والتقليل من التلوث من خلال دورها في الآتي:

1. المحافظة على موارد المواد والطاقة.
2. تقليل الاستهلاك من خلال إطالة عمر المنتج.
3. تقليل الاستهلاك من خلال رفع الكفاءة للعمليات الإنتاجية.
4. توفير الطاقة من خلال التقليل من العمليات الإنتاجية.
5. حماية الأراضي المستخدمة كمكبات لرمي القمامة من خلال التقليل من المخلفات.
6. حماية البيئة من المواد الضارة والسامة الناتجة عن الصناعات الإستخراجية والتحويلية.

3-5-10 إعادة الاستخدام (Reuse)

إعادة الاستخدام يعني مثلاً إعادة استخدام القناني البلاستيكية للمياه المعدنية ومياه الشرب مثلاً بعد تعقيمها، وإعادة مليء الجالونات بعد استخدامها. ان هذا الأسلوب سيؤدي الى تقليل حجم المخلفات إلا انه يستدعي وعياً بيئياً لدى عامة الناس في كيفية التخلص من مخلفاتهم، والقيام بعملية فرز بسيطة لكل المخلفات اللدائنية والورقية والزجاجية والمعدنية قبل التخلص منها، فنجد في كل من اليابان والولايات المتحدة الأمريكية صناديق قمامة ملونة في كل منطقة وشارع؛ بحيث تخصص الصناديق الخضراء لإلقاء المخلفات الورقية، والصناديق الزرقاء للمخلفات اللدائنية والزجاجية والمعدنية والصناديق السوداء لمخلفات الأطعمة أو ما يطلق عليها بالمخلفات الحيوية.



شكل (10-3) مراحل التدوير .

4-5-10 اللدائن المتحللة (Degradable Plastics)

ان المخلفات اللدائنية هي مواد من الصعب التخلص منها بالطبيعة بسبب عدم تحللها ولأنها مواد مصممة لتبقى طويلاً. من المحتمل ان تصمم اللدائن بطريقة بحيث تحتوي على صنف من المونوميرات التي يمكن ان تُهاجم كيميائياً، حيوياً، أو بفعل كيميائي ضوئي (Photochemical Action) بحيث يحدث هذا التحلل خلال فترة زمنية محددة. أن مثل هذه البوليمرات يمكن ان

تُصنَّع كيميائياً { كما هو الحال مع حامض البولي لاتييك (Polylactic Acid) } أو عن طريق العمليات البكتيرية أو الزراعية { كما هو الحال مع البولي ألكونايتس (Polyalkonates) }. على الرغم من أن مثل هذه العمليات تكون مكلفة إلا أن هذه الكلفة ستتخفف بالتأكيد مع زيادة حجم الإنتاج. إحدى الحالات الناجحة في هذا المجال هو إدخال مجموعة الكاربونيل (Carbonyl Group) في البولي أثيلين وذلك عن طريق خلط أول أكسيد الكربون مع الأثيلين خلال عملية التحضير. إن هذه المجاميع من الكاربونيل ستؤدي إلى تكسر السلاسل عند امتصاصها للأشعة فوق بنفسجية. حيث ستتكرر هذه اللدائن إلى قطع صغيرة يمكن حينها أن تخضع للهجوم البكتيري. أن هذه الطريقة كانت ناجحة، على سبيل المثال في الترويج لاختفاء حلقات علب المشروبات، والتي غالباً ما تكون ضارة بالحياة البرية.

إن مشكلة تحلل اللدائن هي ربما غير مرغوباً فيها في مواقع دفن النفايات وذلك نتيجة لتكون الترشيح (Leachants) الذي ربما سيلوث إمدادات المياه.

إن اللدائن المتحللة ربما تستخدم بشكل محدود في تخفيض النفايات وإنتاج أنواع اللدائن بوفرة إلا إن تحللها سيؤدي إلى خسارة معظم محتويات الطاقة لللدائن التي قد تستعاد بطريقة للحصول على الطاقة من هذه النفايات.

10-5-5 حرقها وتحويلها إلى طاقة

وهي إحدى طرائق التخلص من النفايات اللدائنية والتي لها نتائج ايجابية على البيئة حيث يتم حرقها واستعادة الطاقة لتوليد القدرة أو الحرارة. تحتوي اللدائن على الكثير من الطاقة الكامنة النفطية، والذي يعتبر المصدر الرئيسي لخاماتها. وبمعنى آخر إنها عملية استعادة لهذه الطاقة عن طريق حرق هذه اللدائن. لقد أعترض الناس والمهتمون بالبيئة على هذا الإجراء وبالتالي قد أدى ذلك إلى وضع بعض القيود التشريعية عليها. وقد نشأ جزءاً من هذا الاعتراض بسبب صورة الأفران القديمة التي كانت تلوث الهواء بالأدخنة والرماد السام. على أية حال فإنه من الممكن إنشاء أفران ذات تقنيات عالية تكون مصممة للعمل في درجات حرارية ملائمة وبالتجهيز الجوي الكافي فإن هذه المشاكل سيتمكن تقليلها إلى أدنى المستويات. أما المواد السامة الباقية في الأدخنة فقد يمكن إزالتها بالتنظيف، وقد أظهرت الدراسات بأنه لا توجد مشاكل لتلوث الهواء. إن الرماد السام لمعظم الأجزاء لا ينشأ عن اللدائن المغذاة للفرن بل من المواد الأخرى التي تخط مع اللدائن بالإضافة إلى الحشوات والمحتويات المَحْفَزة والصبغات والتي غالباً ما تستخدم في اللدائن. أن التصميم الصحيح لللدائن وفصل الخامات يمكن أن يقلل مثل هذه المشاكل. علاوة على ذلك فإذا لم تحرق بل تم وضعها في مواقع دفن النفايات، فإن التلوث الناتج عن ذلك ربما

سيدخل على البيئة بطريقة لا يمكن السيطرة عليها. ان عملية الحرق ستخفف من الحجم بحيث سنتمكن من احتواء الرماد في ظروف مسيطر عليها بطريقة أفضل. بالإضافة إلى إمكانية جعل الرماد غير ذائباً وتحويله إلى مواد شبيهة بالأسمت يُصعب ذوبانها. ان وسائل تحويل النفايات إلى طاقة على نحو مقبول بيئياً في الوقت الحاضر هي ليست مربحة عندما يكون التمويل قصير المدى. على أية حال فإنها في المدى البعيد تعتبر من الطرائق المفضلة بيئياً وستقل الحاجة إلى الوسائل البديلة للتخلص من النفايات اللدائنية.

6-5-10 الردم

وتعتبر هذه الطريقة هي الأكثر أماناً في التعامل مع المخلفات اللدائنية وذلك عن طريق ردمها في التربة بعيداً عن المناطق العمرانية. إلا ان لهذه الطريقة مساوئها فهي تقلل من خصوبة التربة لأن معظم هذه النفايات لا تتحلل بالبكتيريا والفطريات الموجودة بالتربة.

7-5-10 التدوير الكيماوي (Chemical Recycling)

التدوير الكيماوي هي عملية تتم فيها تكسير البوليمر إلى جزيئاته الأصلية (المونومير). يطلق على هذه العملية فُص البلمرة (Depolymerization). يمكن ربما استخدام المونوميرات كمواد خام لتصنيع بوليمر جديد. هذه الطريقة هي أكثر كلفة من طرائق التدوير الميكانيكية.

هنالك طرائق مختلفة للتدوير الكيماوي:

- الانحلال الحراري (Pyrolysis) وهو تحلل كيماوي للبوليمر ويحرض بالحرارة وبغياب الأوكسجين.
- حيث يمكن تحويل البولي أثيلين تيريفثاليت (PET) إلى ديمثيل تيريفثاليت وجليكول الأثيلين، والذي يستخدم كإضافات إلى المواد الخام الأصلية في إنتاج الـ (PET).
- الهدرجة (Hydrogenation) وهو تفاعل كيماوي مع الهيدروجين.
- التغزير (عمل الغاز) (Gasification) وهي طريقة تحول البوليمرات إلى خليط من أول أوكسيد الكربون (CO) وهيدروجين.

أسئلة الفصل

1. ما هو دور إعادة التدوير في المحافظة على البيئة؟ وضح ذلك مع إعطاء بعض الأمثلة؟
2. هنالك طرائق كثيرة يمكن بواسطتها معالجة النفايات اللدائنية. أيهما باعتقادك ستكون الأفضل ولماذا؟
3. ما هي المحاذير التي يجب أخذها بنظر الاعتبار عند استخدام طريقة إعادة الاستخدام بالنسبة لللدائن؟
4. ما هي الأضرار التي يمكن ان تسببها اللدائن على البيئة؟ وكيف نستطيع الحد منها؟
5. ما هي الأسباب التي قد تؤدي الى انخفاض جودة اللدائن المدورة؟ وكيف يمكن تجنبها؟
6. تعتبر طريقة الحرق والحصول على الطاقة من مخلفات اللدائن إحدى الطرائق التي يعترض عليها الناس المهتمون بالبيئة. كيف نقنعهم بجدوى هذه العملية؟
7. طريقة ردم المخلفات اللدائنية هي إحدى الطرائق الجيدة إلا أن لها عيوبها؟ كيف يمكن معالجة هذه العيوب؟
8. لماذا ساهمت المخلفات اللدائنية بطريقة ملموسة في تلويث البيئة؟
9. أكتشف علماء الكيمياء نوعاً من اللدائن القابلة للتحلل البيولوجي، بين كيف يمكن لهذا النوع من اللدائن في معالجة مشكلة التلوث البيئي؟
10. ما هي المشكلتين الرئيسيتين في التعامل مع النفايات اللدائنية؟
11. أذكر أهم الحوافز التي تدفعنا للاهتمام بمعالجة المخلفات اللدائنية؟
12. ما هي أهم مصادر اللدائن المدورة؟
13. صف طرائق معالجة المخلفات اللدائنية التالية:
 - أ- التدوير
 - ب- إعادة الاستخدام
 - ج- التدوير الكيماوي
 - د- حرقها وتحويلها إلى طاقة
 - هـ- الردم
 - و- اللدائن المتحللة

الفصل الحادي عشر: المواد المركبة Composite Materials

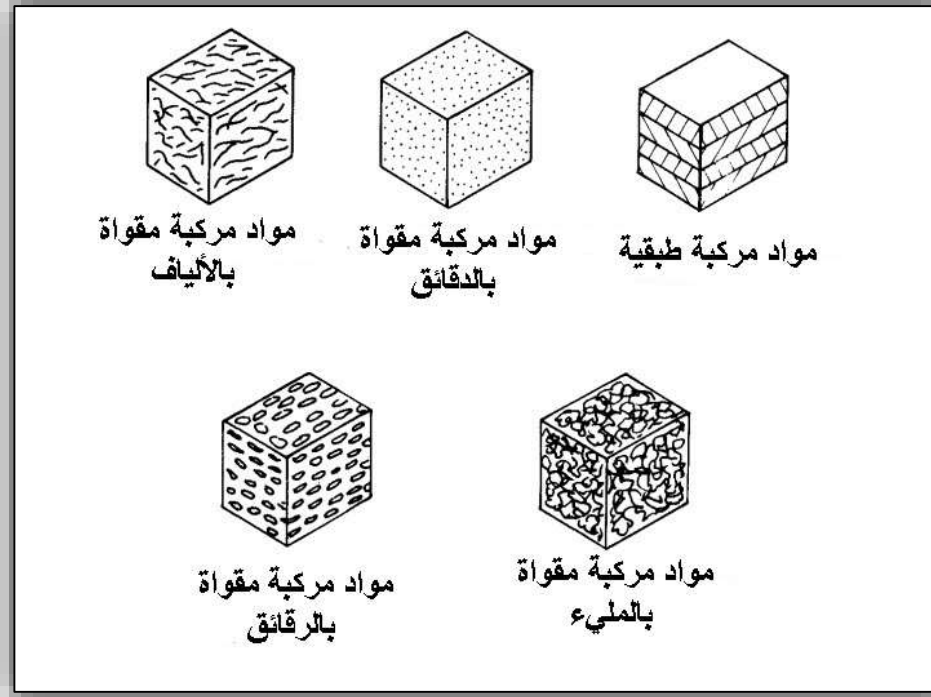
1-11 مقدمة

نظراً لتطور الصناعات العالمية أصبحت المعادن النقية والسبائك المعروفة عاجزة عن تحقيق الصفات والخواص التي يجب توفرها في المنتجات ومن هذه الحاجة كان المطلوب توفير مواد جديدة يطلق عليها المواد المركبة (Composite Materials) ، شكل (1-11). المواد المركبة هي دمج مادتين مختلفتين من حيث التركيب البلوري مع بعضهما في مادة واحدة مثلاً معدن + مادة لا معدنية مثلاً معدن + زجاج أو كتان أو ألياف زجاجية ومطاط الخ... وتعتبر من أهم البدائل الموجودة مؤخراً فهي ذات كلفة قليلة مع توفرها في الأسواق وبخواص ميكانيكية عالية مع إمكانية تطويرها أو تغييرها بحسب الحاجة بالإضافة إلى خفة وزنها وسهولة نقلها. وتصنع على ثلاثة طرق أساسية هي:

1- **ألياف** : fiber وتتم عن طريق زرع أو توزيع ألياف من المادة المراد الحصول على خواصها داخل صفيحة أو طبقة من المادة الأساسية المستخدمة ويتم توزيع الألياف حسب معادلات وبأعداد محسوبة وزاوية معينة فتعطي خواص جديدة مثل الصلادة للمادة الأساس والمتانة للألياف من أشهر الألياف هي الألياف الزجاجية وألياف الكتان وأحياناً تستخدم أسلاك معدنية كما في صناعة الإطارات والسيور الناقلة .

2- **طبقات** : laminar وفيها تفرش طبقة من المادة الأساس وفوقها طبقة من المادة المراد الحصول على خواصها ثم طبقة من المادة الأساس وهكذا طبعا بسمك قد يصل إلى أجزاء المليمتر وتستخدم في صناعة أبدان الطائرات وكذلك الزجاج الأمين كما في زجاج مقدمة السيارة حيث توضع طبقة شفافة من المطاط داخل طبقتين من الزجاج بحيث تلتصق الطبقتين معا لتقاوي أخطار تحطم الزجاج.

3- **دقائق** : grain وفيها يتم غرس حبيبات من المادة المطلوبة داخل المادة الأساس مثلاً غرس حبيبات معدنية في مادة لا معدنية كما في البراص داخل الجرافيت الأطواق المستخدمة في السيارة حيث يتطلب متانة مع امتصاص للصدمة.



شكل (1-11) أصناف المواد المركبة.

1-11 مميزات المواد المركبة ودورها في الصناعة
لقد تفوقت المواد المركبة على المواد الإنشائية التقليدية في الكثير من المجالات وذلك للأسباب التالية:

1. متانتها أكبر بكثير من متانة المواد التقليدية.
2. سهولة تشكيل الأشكال المعقدة وبأحجام وأبعاد كبيرة.
3. خفة الوزن بشكل كبير دون التأثير على خواص المتانة.
4. انخفاض معدلات الكلال والزحف الى مرحلة يمكن اعتبارهما غير موجودين نهائياً.
5. مقاومة حرارية عالية (بالنسبة للمواد المركبة السيراميكية).
6. مقاومة أكبر للمواد الكيميائية والعوامل الجوية (لا تصدأ).
7. ممانعة هائلة ضد انتشار الشقوق التي قد تحدث نتيجة للاهتزازات، وبالتالي فهي ممتازة كمحاور دورانية.

هذه الأسباب جميعها دفعت بالمواد المركبة الى أعلى القائمة وجعلتها العنصر المفضل في إنشاء الطائرات والمركبات الفضائية. فعلى الرغم من أن الطائرات في يومنا هذا لا تزال تحتوي على الكثير من العناصر الإنشائية التقليدية إلا أن المستقبل القريب يبشر بإمكانات أوسع للمواد المركبة.

3-11 عيوب المواد المركبة

ان أهم عيوب المواد المركبة هي:

1. تغير خواصها الميكانيكية والفيزيائية بشكل أسرع من المواد التقليدية تحت الظروف المختلفة.
2. عمرها الخدمي أقصر من عمر المواد التقليدية.
3. مقاومتها الحرارية لا تزال منخفضة نسبياً (رغم وجود دراسات حالية حول هذا الشأن، يكفي بأن نقول بأن مقدمة المكوك الفضائي مصنوعة من المواد المركبة وهي تتحمل القسم الأكبر من الحرارة الناتجة عن طاقة الاحتكاك مع الغلاف الجوي حال عودته الى الأرض).
4. مواد كيميائية مضرّة بالبيئة وغالباً لا يمكن إعادة تصنيعها ويصعب التخلص منها.

11-4 أصناف المواد المركبة (Classification of Composites)

المواد المركبة هي مواد تتألف من طورين منفصلين أو أكثر (طور بيني) وتشمل طور المادة الأساسي (Matrix) والطور المنتشر (Dispersed Phase)، ولها خواص ستختلف اختلافاً كبيراً عن خواص مكوناتها الأصلية.

11-4-1 الطور الأساسي (Matrix Phase)

يطلق على الطور الأولي الذي له خصائص الاستمرارية بالطور الأساسي، يكون هذا الطور عادةً أكثر مطولية وأقل صلادة. ان هذا الطور يمكن أن يصنع من المعادن أو اللدائن أو السيراميك. بصورة عامة تستخدم المعادن واللدائن كأطوار أساسية نظراً لأمتلاكها بعض المطولية والتي تكون أحد الخواص المفضلة؛ أما بالنسبة للطور الأساس السيراميكي، فإن التقوية المضافة تكون من أجل تحسين متانة التصدع.

ان الغرض من الطور الأساسي هو:

- 1) لترابط مع الطور المنتشر (المقوي) بفعاليته خصائص الالتحام والالتصاق
- 2) يعمل كوسيط لنقل الحمل الى وبين الطور المقوي
- 3) لحماية الطور المقوي من البيئة المحيطة وطريقة المناولة (Handling)
- 4) يتحمل فقط قسم قليل من الحمل المسلط

فالمادة الأساس ستزودنا كذلك بالشكل الصلب للمادة المركبة، والذي سيساعد على المناولة والتعامل معها خلال عمليات التصنيع وسنحتاج إليها إلى حد بعيد في المنتج النهائي. سيكون ذلك ضرورياً خاصة عندما تكون الطور المقوي المركب غير مستمر، لأن التقوية سوف لن تمتلك أطوالاً كافية كي تسمح لنا بالتعامل مع الشكل المزود. بسبب كون الطور المنتشر هو في الغالب أكثر صلابة وجساءة، فان الطور الأساس غالباً ما يكون (الرابط الضعيف) في المواد

المركبة من وجهة النظر البنائية. الجدول (1-11) يبين مدى درجات الحرارة التي يمكن استخدامها لأنواع الأطوار الأساسية الثلاث للمواد المركبة.

جدول (1-11) الحدود القصوى التقريبية للاستخدام المستمر للمواد المركبة.

الطور الأساس للمادة المركبة	أقصى درجة حرارة للاستخدام (°C)
اللدائن	400
المعدن	1000
السيراميك	1300

بالإضافة إلى ذلك يجب ان يكون الطور الأساس مطولياً، ومعامل المرونة للطور المقوي (الألياف) أكبر بكثير من معامل المرونة للطور الأساس. أن إحدى وظائف الطور الأساس هي حماية الألياف المنفردة من الضرر السطحي الذي يمكن ان يحدث نتيجة للاحتكاك أو التفاعلات الكيميائية مع البيئة. أن مثل هذه التفاعلات يمكن أن تنشأ عنها عيوباً سطحية قد تؤدي الى نشوء التشققات، والتي ربما ستؤدي الى الفشل عند مستويات منخفضة من الإجهادات. أخيراً يعمل الطور الأساس كذلك على فصل الأطوار المنتشرة (كالألياف) واستناداً الى ليونته النسبية ولدونته، سيعمل على منع توليد التشققات الهشة من ليفة الى أخرى، والتي يمكن ان ينتج عنها فشل كارثي. بعبارة أخرى ان الطور الأساس سيستخدم كحواجز لمنع نمو التشققات. فحتى لو حدث فشلاً في بعض الألياف، فأن التصدع الكلي للمادة المركبة سوف لن يحدث حتى تكون أعداداً كبيرة من الألياف المتجاورة قد تصدعت لتكون مجتمعة الحجم الحرج للشقوق المؤدية الى الانهيار.

2-4-11 الطور المنتشر (المُقَوِّي) (Dispersed Phase (Reinforcing))

يكون الطور الثانوي (أو الأطوار) مغمورة في الطور الأساسي بشكل غير مستمر. يطلق عادة على الطور الثانوي بالطور المنتشر، حيث يكون هذا الطور عادةً أكثر صلابة من مادة الطور الأساسية، لذلك يطلق عليه أحياناً بالطور المُقَوِّي.

ان الغرض الأساسي للطور المقوي هو تزويد أفضل مستويات الصلابة والجبءة للمواد المركبة. ان العديد من المواد الشائعة (السبائك المعدنية، السيراميك واللدائن تخلط مع الإضافات) تمتلك كميات قليلة من الأطوار المنتشرة في بنيتها، ولكنها لا تعتبر كمواد مركبة لأن خواصها تماثل خواص المحتويات الأساسية (فالخواص الفيزيائية للصلب تكون مماثلة لخواص الحديد النقي).

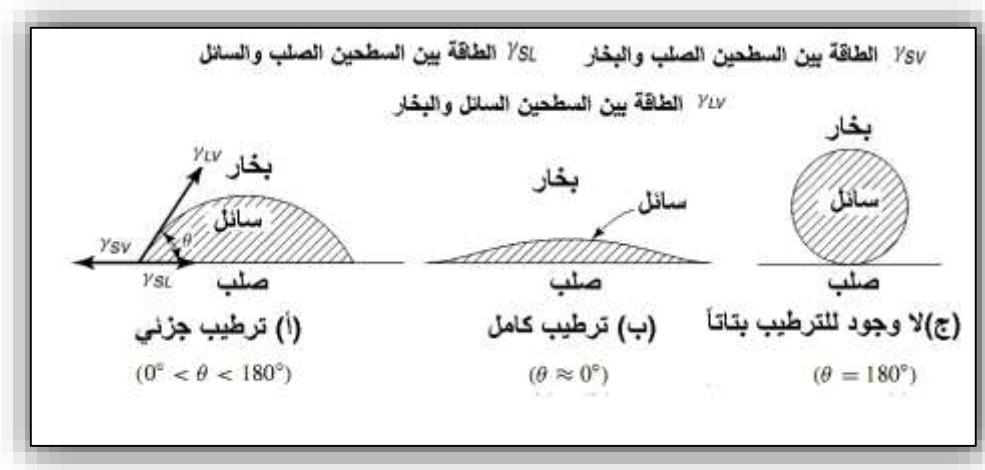
3-4-11-11 The Composite Interphase

كما أشرنا في المقدمة ان هنالك طور بيني، أو منطقة بين الطور الأساس والطور المنتشر (المقوي)، وهي غالباً ما تكون الأساس في تحديد الخواص الميكانيكية للمواد المركبة. فمن الممكن أن تؤثر على الخواص الأخرى كذلك، لكن لكونها تعمل على نقل الأحمال من الطور الأساسي إلى الطور المنتشر، فسيكون تأثيرها الرئيسي على صلابة المادة المركبة. أنه من الأساسي أن تكون قوى التلاصق بين الألياف والطور الأساس عالية لكي نقلل من احتمالية حدوث السحب للألياف (Fibre Pull-Out). بالحقيقة أن صلابة الترابط ستكون عاملاً مهماً عند اختيارنا للتركيبية بين الألياف والطور الأساس. أن الصلابة القصوى للمادة المركبة ستعتمد على مقدار قوة الترابط هذه. أن الترابط الكافي سيكون أساسياً للزيادة القصوى لإمكانية نقل الإجهادات عبر الطور الأساس الضعيف إلى الألياف القوية.

هنالك عدة عوامل تؤثر على التركيب و المدى المكاني للطور البيني. أولها هو قابلية الترطيب (Wettability)، أو السهولة التي يمكن فيها للطور الأساسي السائل أن يرطب (يببل) مكونات الطور المنتشر قبل التجمد. تقاس قابلية السائل لترطيب المادة الصلبة بزواوية التماس بين السطح، كما مبين في الشكل (11-2). بدون أن نذهب إلى الديناميكا الحرارية للترطيب عند هذه النقطة، فمن المهم أن نعرف في مناقشتنا هذه بأن نعرف بأنه فقط زواوية التماس الصغيرة تكون ممثلة إلى الترطيب الجيد (أي أنها المفضلة للترطيب). بينما زواوية التماس الكبيرة (أكبر من 90°) ستشير إلى الترطيب السيء وسوف لن تكون مفضلة لترطيب السائل والصلب. من الواضح ان التفاعل بين السائل والصلب سيكون مفضلاً للحصول على تفاعل جيد بين الطور الأساس والطور المنتشر. في بعض الأحيان هذا غير ممكناً ويعود ذلك إلى المكانة الكيميائية للمكونات مثل هذا موجود بين ألياف السيليكا الزجاجية والمواد الأساس اللدائنية. في مثل هذه الحالات يضاف عامل ترطيب (Wetting Agent) لتحسين قابلية الترطيب. العامل الأخر المهم في تحديد دور الطور البيني هو التفاعلية المتأصلة بين المكونات. أنه من المحتمل حدوث تفاعل بين الطور الأساس والطور المنتشر، أما نتيجةً إلى التفاعل الكيميائي المباشر أو خلال المدى الأطول بحدوث الانتشار للمكونات من طور إلى آخر.

على الرغم من التأكيد على أفضلية حدوث الترابط بين الطورين الأساسي والثانوي (المنتشر) وتشكيل المركب بينهما، إلا انه من المفيد أحياناً في ظروف معينة ان يكون الترابط بين الطورين نسبياً ضعيف. هذه الحالة صحيحة خاصةً للمواد المركبة من نوع (سيراميك-سيراميك)، حيث ان كلا المكونين يكونا هشّين، والطريقة الوحيدة لمنح بعض المطولية للمادة

المركبة تكون عن طريق فشل الطور البيني في مهمته (ترابط ضعيف)، مما سيؤدي إلى حدوث الانسحاب بالألياف إلى خارج (Pull Out) المادة الأساس بطريقة يمكن التحكم بها.



شكل (2-11) تفاعل القطرة السائلة مع المادة الصلبة.

هنالك نظامان لتصنيف المواد المركبة، الأول يعتمد على المادة الأساسية (معادن، سيراميك، لدائن) والنظام الثاني يعتمد على البنية الهيكلية للمادة.

5-11 تصنيف المواد المركبة I (بالاعتماد على المادة الأساس)

حيث تصنف إلى ثلاثة أصناف، شكل (3-11) وهي:

1-5-11 المواد المركبة المعدنية (Metal Matrix Composite) (M M C)

وهذه المواد تتألف من المعدن كمادة للطور الأساسي (ألومنيوم، مغنيسيوم، حديد، كوبلت، نحاس) وأطوار منتشرة قد تكون إما سيراميكية (أكاسيد، كربيدات) أو معدنية (رصاص، تنجستون، موليبدنيوم).

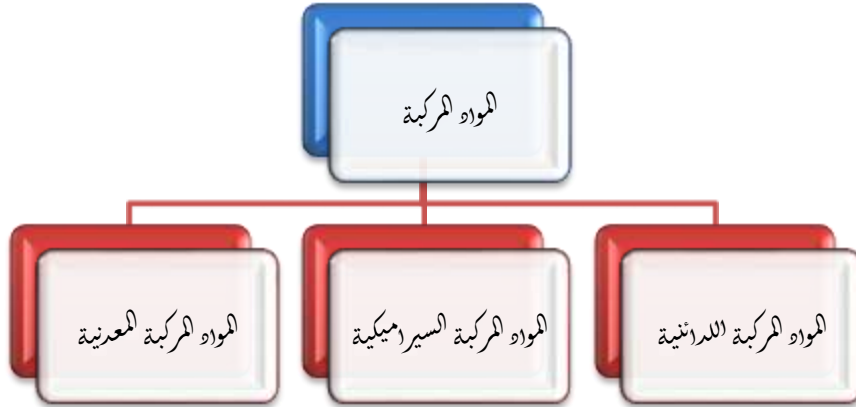
2-5-11 المواد المركبة السيراميكية (Ceramic Matrix Composite) (CMC)

وتتألف هذه المواد من الطور الأساسي الذي هو من السيراميك والألياف المغمورة التي تكون من مواد سيراميكية أخرى (كطور منتشر).

3-5-11 المواد المركبة اللدائية (Polymer Matrix Composite) (PMC)

وتتألف هذه المواد من الطور الأساسي الذي يكون إما من لدائن الترموستك (اللدائن التي تتصلب بالتسخين) كالبولي يستر غير المشبع، والأبيوكسيدات، أو من لدائن الترموبلاستيك (اللدائن الحرارية). كالبولي كربونيت (PC)، (PVC) البولي في سي، النايلون، البولي ستايرين

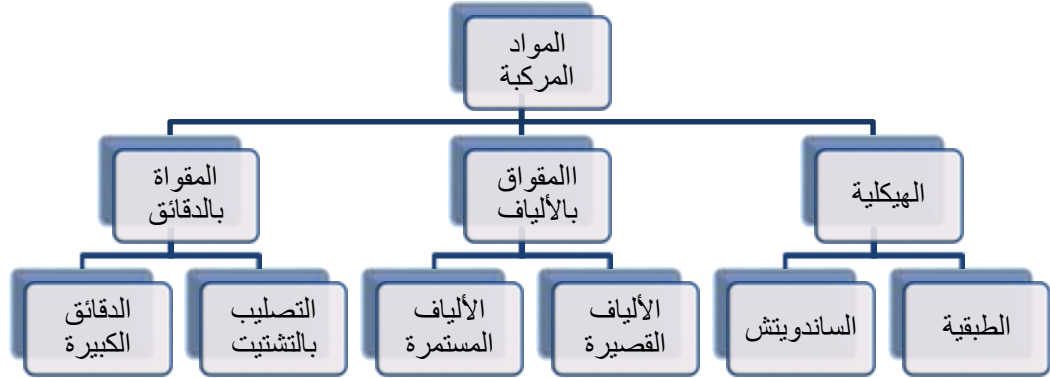
مع الطور المنتشر الذي يكون من الألياف المغمورة والمصنوعة من الزجاج، الكربون، الصلب، أو الكيفلير.



شكل (11-3) تصنيف المواد المركبة بالأعتماد على الطور الاساس.

11-6 تصنيف المواد المركبة II (بالاعتماد على البنية الهيكلية لمادة التقوية) وتصنف كذلك الى ثلاثة أصناف وهي:

11-6-1 المواد المركبة المقواة بالدقائق (Particulate Composite)
 المواد المركبة الدقائقية تشمل مجموعة واسعة من المواد، بدايةً من الأسمنت المقوي بالحبيبات الصخرية (الكونكريت) إلى خليط دقائق السيراميك في المعادن، الذي يطلق عليها السيرميت (Cermets). في جميع الحالات ستتألف المواد المركبة الدقائقية من الطور المقوي الذي تكون أبعاده متساوية في جميع الاتجاهات (تقريباً كروي الشكل)، وجميع الأطوار في المادة المركبة ستتحمل قسم من الحمل المسلط. أن النسبة المئوية للدقائق هي من نسب قليلة الى 70%. ان أحد أهم أصناف المواد المركبة الدقائقية هي السبائك المصادة بالتشيت (Dispersion - Hardened Alloys). حيث تتألف مكونات هذه المواد من دقائق صلدة في مادة أساسية معدنية طرية. نادراً ما تتجاوز النسبة الحجمية للمحتويات الدقائقية 3%، وتكون هذه الدقائق صغيرة جداً، أحجامها تحت المايكرومتر. أن خصائص هذه الدقائق ستتحكم بشكل كبير بخواص السبيكة، والمسافات التي بين الدقائق في المدى (0.2 – 0.3 μm) عادةً ستساعد في الحصول على أفضل الخواص. عندما يزداد حجم الدقائق، سنحتاج الى مواد أقل لإنجاز المسافة المطلوبة بين الدقائق.

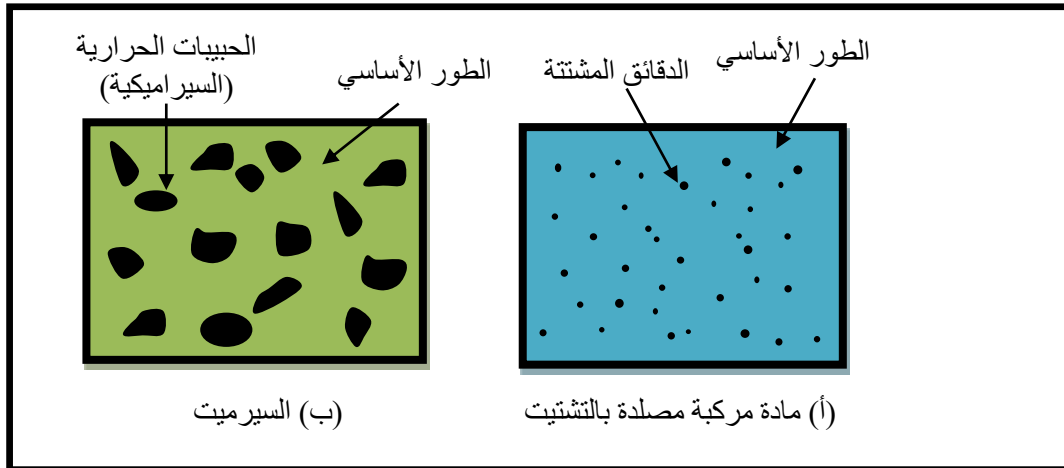


شكل (11-4) تصنيف المواد المركبة بالأعتماد على البنية الهيكلية للتقوية.

السيرميت هي مواد مركبة بالدقائق وهي مشابهة للسبائك المصلاة بالتشتيت، إلا انها تتألف حبيبات سيراميكية حجمها أكبر (سير-) تنتشر في مادة أساس معدنية (-ميت) لاحظ الشكل (11-5).

تتألف هذه المواد من المادة الأساسية المقواة بالطور المنتشر والذي يكون بشكل دقائق، وهي على نوعين:

- 1- المواد المركبة بالدقائق العشوائية الاتجاه.
- 2- المواد المركبة بالدقائق المنتظمة الاتجاه.



شكل (11-5) مقارنة بين (أ) مادة مركبة مصلاة بالتشتيت؛ (ب) سيرميت.

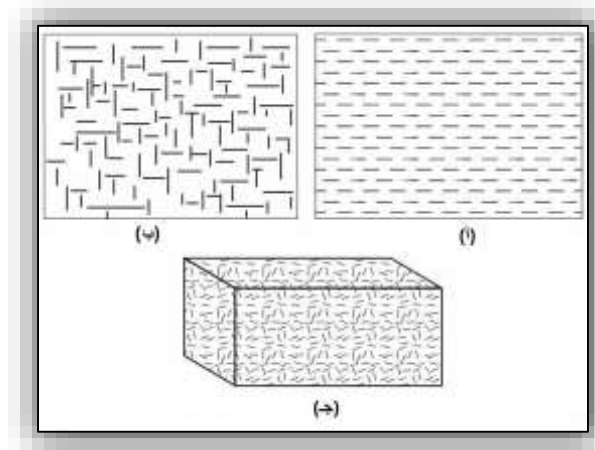
حيث ان الطور المنتشر لهذه المواد سيتألف من بعدين لصفائح مسطحة (رقائق) توضع بطريقة موازية لبعضها البعض.

11-6-2 المواد المركبة المقواة بالألياف (Fibrous Composite)

ان أغلب الخواص الميكانيكية للمواد المركبة المدعمة بالألياف تتأثر بمشاركة الألياف وهناك عدة عوامل تؤثر على هذه المشاركة وهي:

1. الخواص الأساسية للألياف المستخدمة نفسها؛
2. السطوح البينية الفاصلة بين الألياف والمادة الأساس؛
3. كمية الألياف المستخدمة (النسبة الحجمية للألياف)؛
4. اتجاهات الألياف وتوزيعها داخل المادة المركبة.

الخواص الميكانيكية الأساسية لأغلب الألياف الشائعة مبينة في الجدول (11-2). يتم التحكم بالتفاعل بين السطوح البينية التي تفصل بين الألياف والمادة الأساس بدرجة الترابط الموجودة بينهما. وهذه تتأثر بشدة بالمعالجات التي تجرى على سطح الألياف. هنالك ثلاثة أنواع من التقوية بالألياف موضحة في الشكل (11-6).



شكل (11-6) أنواع اتجاهات التقوية بالألياف. (أ) ذات بعد واحد؛ (ب) ثنائية الأبعاد؛ (ج) ثلاثية الأبعاد.

11-6-2-1 المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة

حيث أن هذه المواد تتألف من ألياف قصيرة تقوي المادة المركبة (طولها > 100 قطرها)

وهي منتشرة في الطور الأساسي وتكون على نوعين:

- 1- مواد مركبة مقواة بألياف عشوائية الاتجاه.
- 2- مواد مركبة مقواة بألياف منتظمة الاتجاه.

11-6-2-2 المواد المركبة المقواة بالألياف الطويلة

ويتألف هذا النوع من المواد المركبة من المادة الأساسي المقواة بالطور المنتشر والذي يكون على شكل ألياف مستمرة وطويلة وتكون على نوعين:

- 1- ألياف ذات انتظام اتجاهي وحيد.
- 2- ألياف ذات انتظام اتجاهي ثنائي (نسيج).

11-6-3 المواد المركبة الطبقيّة (الهيكلية) (Laminate Composites)

عندما تتألف المواد المركبة المقواة بالألياف من عدة طبقات وباتجاهات مختلفة للألياف يطلق عليها مواد مركبة عديدة الطبقات. ان تقنية التصنيع المستخدمة ستتحكم بمقدار كبير بكمية الألياف التي نستطيع استخدامها بالمواد المركبة. لكن استخدام الأنسجة (Fabrics) المتألفة من الألياف الصغيرة المكتظة سوف يعطي نسبة حجمية أكبر للألياف في المواد المركبة الطبقيّة عما هو موجود في الأنسجة

التي تصنع من ألياف ذات قطر كبير، أو التي تكون فيها المسافات كبيرة بين حزم الألياف. أن قطر الألياف المستخدمة هو عامل مهم حيث أنه كلما صغر كلما زادت كلفته لكنه سيزودنا بمساحة سطحية أكبر، أفضل انتشاراً لتوزيع الأحمال من خلال السطوح البينية. كقانون عام، فان الجساءة والصلابة للطبقة سوف تزداد بزيادة كمية الألياف الموجودة فيها. ولكن على الرغم من ذلك سنلاحظ انه عندما تكون النسبة الحجمية للألياف حوالي (60-70%) (اعتماداً على الطريقة التي تكتظ فيها الألياف سوية) فالجساءة يمكن ان تستمر بالزيادة، وصلابة الطبقة سوف تصل إلى القيمة القصوى ثم تبدأ بالانخفاض وذلك يعود الى عدم توفر المادة الأساس لتمسك الألياف سوية بطريقة مناسبة.

جدول (11-2) الخواص الأساسية للألياف والمواد الهندسية الأخرى.

معامل المرونة النوعي	الكثافة (g/cm^3)	معامل المرونة (GPa)	صلابة الشد (MPa)	نوع المادة
150-90	1.8	270-160	3500	كربون HS
180-150	1.8	325-270	5300	كربون IM
240-180	1.8	440-325	3500	كربون HM
200+	2.0	440+	2000	كربون UHM
40	1.45	60	3600	أراميد LM
80	1.45	120	3100	أراميد HM
120	1.47	180	3400	أراميد UHM
27	2.5	69	2400	زجاج E
34	2.5	86	3450	زجاج S2
31	2.2	69	3700	زجاج-كوارتز
26	2.7	70	400	سبيكة ألومنيوم (7020)
24	4.5	110	950	تيتانيوم
26	7.8	205	450	الصلب الطري (55 Grade)
25	7.8	196	800	الصلب المقاوم للصدأ (A5-80)

7-11 البنية الهيكلية للمواد المركبة (Structure of composites)

تحدد بنية المواد المركبة خواصها بمدى واسع، فعوامل البنية التي تؤثر على الخواص

المهمة للمواد المركبة هي:

- * صلابة الترابط للمنطقة البينية التي تفصل بين الطور المنتشر والمادة الأساس.
- * أشكال الأطوار المنتشرة (حبيبات، رقائق، ألياف، طبقات).
- * اتجاهية الأطوار المنتشرة (عشوائية أو منتظمة).

11-7-1 الرابطة البينية (Interfacial Bonding)

الترابط القوي (الالتصاق) بين الطور الأساسي والطور المنتشر سيزود المادة المركبة بالقابلية على نقل الحمل المسلط على المادة إلى الطور المنتشر عن طريق السطوح البينية. ان الترابط هو أحد الضروريات المهمة للحصول على أفضل الخصائص الميكانيكية للمواد المركبة. هنالك ثلاثة أنواع للسطوح البينية بين الطورين:

- 1- الرابطة المباشرة بدون وجود طبقة وسطية. في هذه الحالة فإن التلاصق (بالتطبيب) سيزودنا إما برابطة تساهمية (Covalent Bonding) أو بقوة فان دير فان (Van Der Waal Force).
- 2- طبقة وسطية (طور داخلي) وتكون على شكل محلول جامد من محتويات المادة الأساس والطور المنتشر.
- 3- طبقة وسطية على شكل طور ترابط ثالث (مادة لاصقة).

11-7-2 شكل واتجاه الطور المنتشر

(Shape and Orientation of Dispersed Phase)

تأتي أهمية هذا العامل في البنية من الحقيقة التي تصف المواد المركبة بالاعتماد على هذا المعامل حيث يتم تصنيفها إلى :

1. مواد مركبة مقواة بالدقائق.
2. مواد مركبة مقواة بالألياف.
3. مواد مركبة طبقية.

11-7-2-1 المواد المركبة المقواة بالدقائق

تتألف هذه المواد من المادة الأساس المقواة بالطور المنتشر الذي يكون في شكل دقائق. إن تأثير الدقائق المنتشرة على خواص المادة المركبة سيعتمد على أبعاد هذه الدقائق. ان الدقائق الصغيرة جدا (قطرها أقل من 0.25 مايكرون) ستنتشر في المادة الأساس وستعيق حركة الإنخلاعات والتشوهات للمادة. ان مثل هذه التقوية (التصليب) ستؤثر بطريقة مماثلة إلى طريقة التصليد بالتريسيب (Precipitation Hardening). فعلى النقيض من طريقة التصليد بالتريسيب، والتي تختفي عند درجات الحرارة العالية عندما تذوب الدقائق المترسبة في المادة الأساس، فإن الطور المنتشر للمواد المركبة المقواة بالدقائق (دقائق سيراميكية) ستكون في الغالب مستقرة عند درجات الحرارة العالية، لذلك سيتم الاحتفاظ بالتقوية في هذه الحالة. تصمم العديد من المواد المركبة لكي تستخدم في التطبيقات التي تتعرض فيها المواد الى درجات الحرارة العالية.

تمتلك دقائق الطور المنتشر الكبيرة تأثير تقوية أقل إلا أنها تستطيع أن تشارك في تحمل الأحمال المسالطة على المادة، مؤدية إلى زيادة في الصلابة (Stiffness) وانخفاضاً في المطولية.

ان الدقائق الصلدة المنتشرة في المادة الأساس اللينة ستؤدي إلى زيادة مقاومتي البلى (Wear) والتحات (Abrasion). أما الدقائق الطرية المنتشرة في المادة الأساس الأكثر صلادة ستحسن من قابلية التشغيل بالقطع (دقائق الرصاص المنتشرة في الصلب والنحاس) وستقلل من معامل الاحتكاك (القصدير المنتشر في الألمنيوم أو الرصاص المنتشر في النحاس).

المواد المركبة ذات المادة الأساس التي تمتلك موصلية كهربائية عالية (كالنحاس والفضة) مع استخدام طور منتشر حراري (كالتنجستون ، الموليبدنيوم) ستستخدم في التطبيقات الكهربائية عند درجات الحرارة العالية.

عندما يتألف الطور المنتشر لهذه المواد من دقائق ذات بعدين (Flakes) والتي توزع بطريقة موازية لبعضها البعض، فإن المادة ستظهر تباين في الخواص (Anisotropy) (اعتماد الخواص على المحور أو طول المستوى الذي بموجبه تقاس الخواص). في حالة ترتيب الدقائق بصورة متوازية إلى مستوى معين، فإن المادة ستظهر خواصاً متماثلة في جميع الاتجاهات الموازية لهذا المستوى ولكنها أي الخواص ستختلف في الاتجاه العمودي على هذا المستوى.

11-7-2-2 المواد المركبة المقواة بالألياف (Fibrous Composites)

في هذا النوع من المواد المركبة سيكون الطور المنتشر على شكل ألياف وسيحسن الصلابة، الصلابة ومتانة الكسر (Fracture Toughness) للمادة، وسيعيق نمو التشققات في الاتجاه العمودي للألياف.

إن التأثير على زيادة الصلابة سيصبح أكبر عندما يتم تنظيم اتجاهات هذه الألياف، وعندما تسلط الإجهادات على نفس اتجاهات هذه الألياف.

إن تأثير هذه التقوية للألياف الطويلة (الألياف المستمرة) سيكون أكبر مما تحدثه الألياف القصيرة في تقوية المواد المركبة.

ان المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة، تتألف من مادة أساس ينتشر فيها ألياف قصيرة (طولها $> 100 \times$ قطرها) وستمتلك قابلية محدودة للمشاركة في تحمل الأحمال.

الحمل المسلط على المواد المركبة المقواة بالألياف الطويلة سيتم تحمل معظمه عن طريق الطور المنتشر (الألياف). أما المادة الأساس في هذه المواد فتستخدم فقط كمادة رابطة للألياف وللحفاظ عليها بالشكل المطلوب وحمايتها من الفشل الميكانيكي أو الكيماوي.

3-2-7-11 المواد المركبة الطبقيّة: Laminates Composites

تتألف المواد المركبة الطبقيّة من طبقات مختلفة الاتجاهية أو مادة أساس مقواة بطور منتشرة بشكل صفائح.

عندما تتألف المادة المركبة المقواة بالألياف من عدة طبقات وباتجاهات مختلفة للألياف، فسيطلق عليها مواد مركبة عديدة الطبقات.

المواد المركبة الطبقيّة ستزيد من الصلابة الميكانيكية في اتجاهين وستكون الصلابة قليلة فقط في الاتجاه العمودي على الاتجاه المفضل للألياف في الصفيحة.

أسئلة الفصل

1. ما هي المواد المركبة ولماذا ظهرت الحاجة لمثل هذه المواد؟
2. ما هي مميزات المواد المركبة ودورها في الصناعة؟
3. عدد أهم عيوب المواد المركبة؟
4. ما الفرق بين الطور المنتشر والطور الأساس في المواد المركبة؟
5. قارن بين الخصائص الميكانيكية للطورين الأساس والمنتشر في المواد المركبة؟
6. صنف المواد المركبة بالاعتماد على المادة الأساس؟
7. صنف المواد المركبة بالاعتماد على البنية الهيكلية لمادة التقوية؟
8. ما الذي يحدد بنية المواد المركبة خواصها بمدى واسع؟
9. بين أنواع السطوح البينية بين الطورين (الأساس والمنتشر)؟
10. ما هو دور الرابطة البينية بين الطور الأساسي والطور المنتشر في المواد المركبة؟
11. ما هو تأثير الدقائق الطرية المنتشرة في المادة الأساس الأكثر صلادة على خواص المواد المركبة؟
12. ما هو تأثير الدقائق الصلدة المنتشرة في المادة الأساس اللينة على خواص المواد المركبة؟
13. ما الغاية من صناعة المواد المركبة الطبقيّة؟

الفصل الثاني عشر: تخمين خواص المواد المركبة

Estimation of Composite Materials Properties

1-12 مقدمة

يمكننا أن نقدر خواص المواد المركبة قبل تصنيعها وغالباً ما تكون هذه التقديرات مقبولة وتعتمد جميعها على النسبة الحجمية لكل طور نسبةً الى الحجم الكلي. وعلينا تذكر ان هذا التخمين تعتمد دقته بدرجة كبيرة على ترتيب وتوزيع الألياف وهو يستخدم فقط للمواد المقواة بالألياف.

2-12 تخمين خواص المواد المركبة

المواد المركبة إما أن تكون ذات خواص متماثلة (isotropic) أو متباينة (anisotropic) ويتحدد ذلك عن طريق البنية الهيكلية للمواد المركبة.

المواد المتماثلة الخواص (Isotropic Materials): هي المواد التي لا تعتمد خواصها على الاتجاه الذي تقاس فيه.

المواد المتباينة الخواص (Anisotropic materials): هي المواد التي تكون خواصها على طول محور معين أو موازي إلى مستوى معين مختلفة عن خواصها المقاسة في الاتجاهات الأخرى.

3-12 قانون الخلط (Rule of Mixture)

ان قانون الخلط هو طريقة تستخدم للحصول على تخمين أو تقدير لخواص المواد المركبة بالاعتماد على فرضية تقول بأن خواص المواد المركبة هي معدل النسبة الحجمية لخواص الأطوار (الطور الأساس والطور المنتشر).

بموجب قانون الخلط لخواص المواد المركبة يمكن تخمين ما يلي:

- الكثافة Density
- معامل التمدد الحراري (Coefficient of Thermal Expansion)

- معامل المرونة Modulus of Elasticity
- معامل الجساءة Shear Modulus
- نسبة بويسون Poisson's ratio
- صلابة الشد Tensile Strength

4-12 المواد المركبة المقواة بالدقائق

Particle- Reinforced Composites

كما اشرنا في الشكل (4-11) فان المواد المركبة المقواة بالدقائق الكبيرة (Large Particle) والمواد المركبة المقواة بالتشتيت (Dispersion Strengthened) هما فرعين من صنفى المواد المركبة المقواة بالدقائق. حيث الفرق بينهما سيعتمد على آلية التقوية أو التصليب.

ان المصطلح (كبير) يستخدم للإشارة إلى ان التفاعل بين الدقائق والطور الأساس لا يمكن أن يكون بالمستوى الذري أو الجزيئي ، بالأحرى يستخدم آلية الاستمرارية (Continuum Mechanics). لأغلب هذه المواد المركبة ،الطور المنتشر الدقائقى سيكون أصلد وأكثر جساءة من الطور الأساسى . ان هذه الدقائق ستعمل على إعاقة حركة الطور الأساس فى المناطق القريبة من كل دقيقة. جوهرياً، سيقوم الطور الأساسى بنقل بعض الإجهاد المسلط الى الدقائق، والتي بدورها ستتحمل جزء من الحمل. ان درجة التقوية أو التحسين للسلوك الميكانيكى سيعتمد على الروابط القوية للسطوح البينية بين الطور الأساسى والدقائق.

فى المواد المركبة المقواة بالتشتيت ، تكون الدقائق فى العادة اصغر بكثير ، وتمتلك أقطاراً ما بين 0.01 الى 0.1 μm (10-100 nm). ان التفاعل بين الدقائق والطور الأساس والذى يؤدي الى التصليب سيحدث فى المستوى الذري أو الجزيئى .آلية التصليب هنا ستكون مماثلة إلى طريقة التصلب بالترسيب .فالطور الأساس سيتحمل القسم الأكبر من الأحمال المسلطة ،والدقائق المشتتة الصغيرة ستعيق أو تعرقل حركة الإنخلاعات. لذلك فإن تشوه اللدائن سيعرقل بطريقة بحيث ان إجهادى الشد والخضوع والصلادة سيتحسنون.

1-4-12 المواد المركبة المقواة بالدقائق الكبيرة

بعض اللدائن التي تستخدم الحشوات هي حقاً مواد مركبة مقواة بالدقائق الكبيرة .فالحشوات تعدل أو تحسن خواص المواد /أو تستبدل بعض حجوم اللدائن بمواد اقل تكلفة .النوع الأخر للمواد المركبة المقواة بالدقائق الكبيرة هو الكونكريت الذي يتألف من الاسمنت(الطور الأساس) والرمل والحصى(الطور المنتشر الدقائقى)ان الدقائق يمكن ان تمتلك أشكالاً هندسية مختلفة لكن يجب ان تكون تقريبا بنفس الأبعاد فى جميع الاتجاهات (Equiaxed)؛ للتصليب المؤثر ،فإن الدقائق يجب

ان تكون صغيرة وموزعة بانتظام خلال الطور الأساس. بالإضافة الى ذلك، فان النسب الحجمية للطورين سيؤثران على السلوك الميكانيكي، حيث ان الخواص الميكانيكية ستعزز بزيادة المحتوى الدائقي . هنالك معادلتان تعبران عن اعتمادية معامل المرونة على النسبة الحجمية للأطوار المكونة للمادة المركبة ذات الطورين.

ان معادلة الخلط هذه يمكن أن تنتبأ بأن معامل المرونة للمادة المركبة سيقع بين الحدين الأعلى ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \dots\dots\dots (1.12)$$

والحد الأدنى ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$E_c(l) = \frac{E_m V_p}{V_m E_p + V_p E_m} \dots\dots\dots (2.12)$$

حيث أن:

E: معامل المرونة

V: النسبة الحجمية

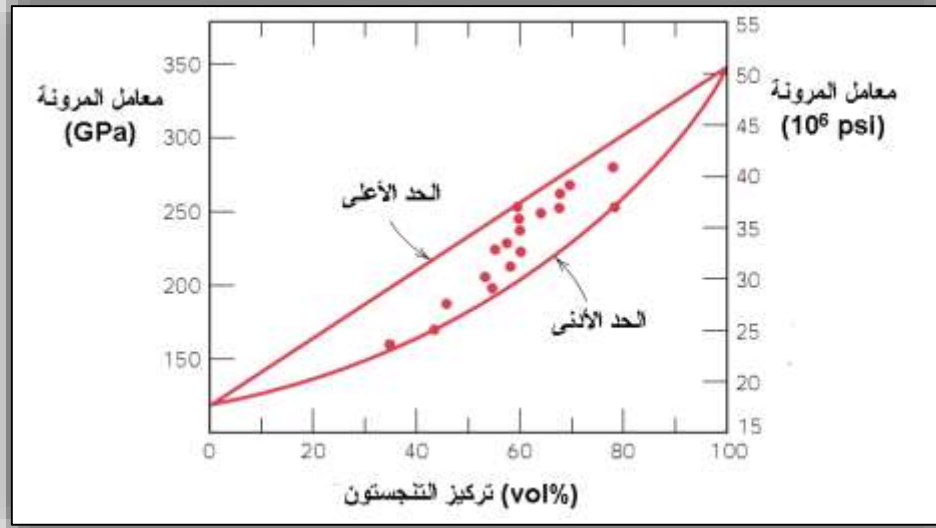
والرموز الصغيرة تمثل:

c: المادة المركبة

m: الطور الأساس

P: الطور المنتشر الدائقي

الشكل (1-12) يبين العلاقة ما بين الحدين الأدنى والأعلى للمنحني E_c ضد V_p للمادة المركبة (نحاس-تنجستون) والتي فيها يكون التنجستون هو الطور الدائقي (المقوي)؛ البيانات العملية هي النقاط التي بين المنحنيين.

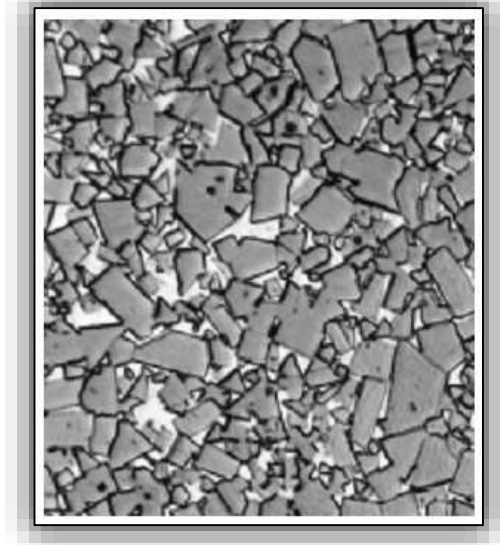


شكل (1-12) معامل المرونة ضد النسبة الحجمية للنتجستون في المادة المركبة المعدنية التي طورها الأساس من النحاس والمقواة بدقائق النتجستون. لقد تم رسم الحدين الأعلى والأدنى بموجب المعادلتين (1-12) و(12-2). البيانات العملية هي النقاط المتضمنة في المنحني.

يستفاد من المواد المركبة المقواة بالدقائق الكبيرة في أنواع المواد الثلاثة (المعادن، اللدائن والسيراميك).

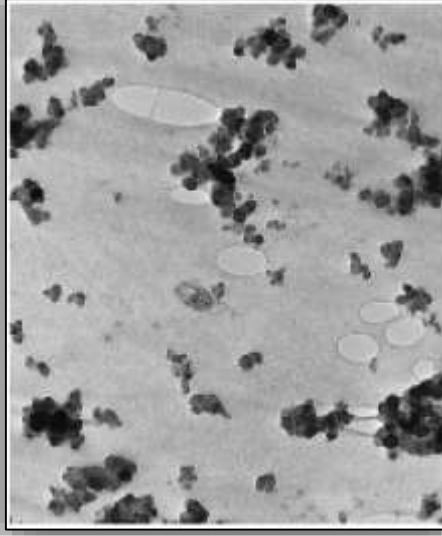
السيرميت (cermets) هو احد الأمثلة على المواد المركبة السيراميكية-المعدنية. أن أكثر أنواع السيرميت شيوعاً هو الكربيد المسمنت (Cemented Carbide)، الذي يتألف من دقائق صلدة جدا من سيراميك كربيدي حراري ككربيد النتجستون (WC) أو كربيد التيتانيوم (TiC) المضمن في الطور الأساس المعدني كالكوبالت أو النيكل.

يستفاد من المواد المركبة بمجال كبير في صناعة عدد القطع للصلب الكربوني المصلد. حيث أن الدقائق الصلدة للكربيدات ستزودها بسطوح قطع ولكن لكونها هشة جدا فسوف لن تكون قادرة على تحمل إجهادات القطع. ان المتانة يمكن أن تعزز بالتضمين (Inclusion) في طور أساسي معدني مطولي، والتي ستعزل الدقائق الكريديية عن بعضها البعض وستمنع توليد التشققات ما بين الدقائق. ان كلاً من الطور الأساس والطور الدقائقي سيكونان مواداً حرارية، لتحمل درجات الحرارة العالية المتولدة نتيجة عملية القطع على المادة التي تكون صلدة جداً. لا توجد مادة واحدة يمكن ان تزودنا بتركيبة من الخواص التي يمتلكها السيرميت. يمكن الحصول على نسبة حجمية كبيرة للطور الدقائقي والاستفادة منه وغالباً ما تتجاوز 90 vol%. لذلك فإن الفعل الاحتكاكي للمادة المركبة سيكون في اقصى قيمة له. صورة مجهرية للكربيد المسمنت WC-Co مبينة في الشكل (12-2).



شكل (12-2) صورة مجهرية للكربيد المسمنت WC-Co. المناطق البيضاء هي طور الكوبالت الأساس؛ المناطق الغامقة هي دقائق كربيد التنجستون. التكبير $\times 100$.

ان كلا من الأستمرات واللدائن يتم تقويتها حاليا بمواد دقائقية مختلفة. أن استخدامنا للعديد من المطاط الحديث سيتحدد بشدة بدون استخدام التقوية له بالدقائق كأسود الكربون (السناج) (Carbon Black). يتألف خام الأسود الكربون من دقائق كربونية كروية الشكل صغيرة جدا، تنتج بواسطة حرق الغاز الطبيعي أو الزيت في محيط يحتوي على كمية محدودة من الهواء. عند إضافته للمطاط المفلكن، فان هذه المادة الرخيصة الثمن سوف تعزز من صلابة الشد، والمتانة، ومقاومة التمزق والبليان. ان عجلات السيارات تحتوي على 15 . 30 % من الأسود الكربون. لكي يكون لأسود الكربون تميز في التقوية، فأن الحجم الدائقي له يجب ان يكون جدا صغير بقطر ما بين 20 - 50 nm ، كذلك يجب ان تكون هذه الدقائق منتشرة بانتظام خلال المطاط ويجب ان تكون رابطة تلاصق قوية مع الطور الأساس (المطاط). التقوية بالدقائق التي تستخدم مواد أخرى (كالسليكا) سيكون تأثيرها اقل بسبب لأن هذا التفاعل الخاص بين جزيئات المطاط وسطوح الدقائق غير موجود. الشكل (12-3) يبين صورة بالميكروسكوب الالكتروني للمطاط المقوى بدقائق أسود الكربون .



شكل (12-3) صورة مجهرية توضح دقائق أسود الكربون الكروية الشكل المقوية للمطاط الصناعي المستخدم في صناعة إطارات السيارات.

12-4-2 المواد المركبة المقواة بالتشيت

يمكن تصليب و تصليد المعادن و السبائك المعدنية باستخدام تشيت منتظم لنسب حجمية متعددة من الدقائق الناعمة و الصلدة جدا و المواد الخاملة. ان الطور المشتت ربما يكون معدنيا او غير معدنيا : أكاسيد المواد في الغالب يتم استخدامها. مرة أخرى، فان آلية التصليب ستشمل التفاعل بين الدقائق و الإنخلاءات ضمن الطور الأساسي، كما يحصل في تصليب بالترسيب. ان تأثير التصليب بالتشيت هو ليس واضح كما هو مع التصليب بالترسيب ؛ لكنه يبقى فعالا عند درجات الحرارة العالية لفترة أطول بسبب كون الدقائق المشتتة قد تم اختيارها لتكون غير متفاعلة مع الطور الأساس . في السبائك المصلدة بالترسيب ، ستختفي الزيادة في الصلابة مع ارتفاع درجة الحرارة كنتيجة لنمو الراسب أو ذوبان الطور المترسب.

ان الصلابة العالية عند درجات الحرارة العالية لسبائك النيكل يمكن ان تتعزز بمقدار كبير عند إضافة حوالي 3 vol% من الثوريا (ThO_2) كدقائق مشتتة ناعمة ، ان هذه المواد تعرف بالثوريا المشتتة في النيكل. يمكن ان نحصل على نفس التأثير في نظام الألمنيوم - أوكسيد الألمنيوم(ألومينا) . ان عملية طلاء ألومينا لاصقة ورقيقة ستؤدي الى تكوين رقائق ألومنيوم على السطح بأحجام صغيرة جدا من الألمنيوم سمكها (0.1-0.2 μm) والتي تشتتت داخل الطور الأساس (الألمنيوم)، ان هذه المادة يطلق عليها مسحوق الألمنيوم الملبد (Sintered Aluminum Powder).

5-12 المواد المركبة المقواة بالألياف

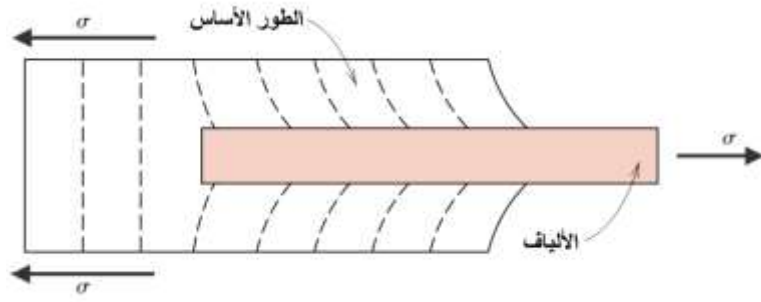
تقنياً اغلب المواد المركبة المهمة هي تلك التي يكون فيها الطور المنتشر بشكل ألياف. ان الهدف من التصميم للمواد المركبة المقواة بالألياف غالباً ما يتضمن الصلابة العالية أو / مع الجساءة بالاستناد إلى الوزن كعامل أساسي. أن هذه الخصائص يعبر عنها في مصطلح الصلابة النوعية (Specific Strength) ومعامل المرونة النوعي كمتغيرات، والتي تناظر بالترتيب إلى نسب صلابة الشد إلى الجاذبية النوعية و معامل المرونة إلى الجاذبية النوعية . ان المواد المركبة المقواة بالألياف التي تمتلك خواصاً استثنائية بالصلابة النوعية ومعامل المرونة النوعي العالين تم إنتاجها بالاستفادة من كثافة المنخفضة للألياف والمواد الأساس. كما اشرنا في التصنيف للمواد المركبة فأن المواد المركبة المقواة بالألياف تصنف حسباً لطول الألياف. بالنسبة للألياف القصيرة، فأنها ستكون صغيرة جداً لإحداث تحسين مميز في الصلابة.

1-5-12 تأثير طول الليفة

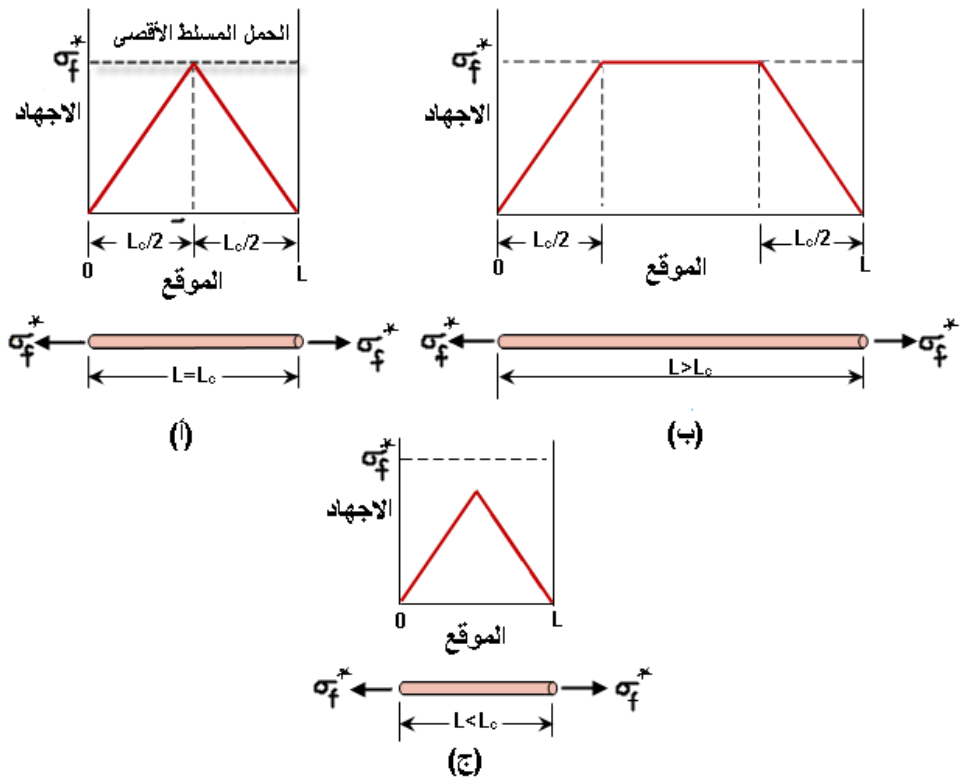
ان آلية التقوية في المواد المركبة المقواة بالألياف ستعتمد ليس على خواص الألياف فقط ، لكن كذلك بدرجة كبيرة على الطريقة التي سيتم بواسطتها نقل الحمل إلى الألياف عن طريق الطور الأساس أهمية هذا المدى لهذا الحمل المنتقل تكون في مقدار الروابط البينية بين الألياف -الطور الأساس عند نهايات الألياف، سامحة لتشوه الطور الأساس بنمط كالذي مبين في الشكل (4-12) بعبارة أخرى ، سوف لن يكون هنالك انتقال للحمل من الطور الأساس إلى أطراف النهايات لكل ليفه . بعض أطوال الليفة الحرجة ستكون ضرورية للتصليب والجساءة المؤثرين في المواد المركبة . ان الطول الحرج (l_c) للليفة سيعتمد على قطر الليفة (d) وعلى القيمة القصوى للصلابة (الشد) σ_f^* ، وعلى صلابة الروابط بين الطور الأساس-الألياف (أو صلابة القص للطور الأساس ، أيهما اقل) τ_c بموجب المعادلة التالية :

$$l_c = \frac{\sigma_f^* \cdot d}{2\tau_c} \dots \dots \dots (3.12)$$

للعديد من التركيبات لألياف الزجاج والكربون-الطور الأساس، فأن الطول الحرج سيكون بمقدار (1mm) والذي مداه يتراوح بين ما بين 20-150 مرة بقدر قطر الليفة.



شكل (12-4) نمط التشوه في الطور الأساس المحيط بالألياف المعرضة لقوى الشد.



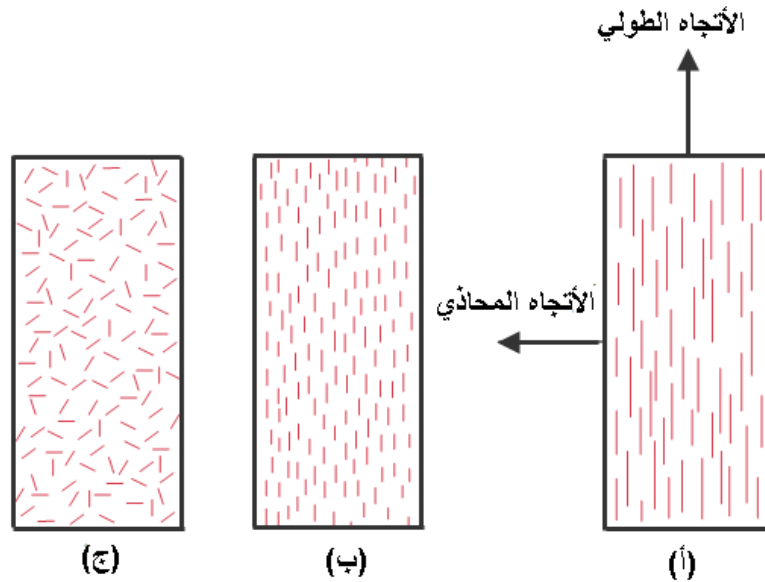
شكل (12-5) العلاقة بين الإجهاد-الموقع عندما يكون طول الليفة l (أ) مساوياً الى الطول الحرج l_c ، (ب) أكبر من الطول الحرج، (ج) أقل من الطول الحرج في المواد المركبة المقواة بالألياف والمعرضة إلى إجهادات شد مساوية الى صلابة الشد للألياف σ_f^* .

عندما يكون الإجهاد مساوياً الى σ_f^* ويسلط على الألياف التي تمتلك طولاً مساوياً للطول الحرج، فإن شكل الإجهاد .الموقع ميبين في الشكل (12-5-أ) كنتيجة لذلك فإن هذا سيكون أقصى حمل للألياف يمكن ان ينجز بالاتجاه المحوري لليفة .عندما يزداد طول الليفة الى l فإن التقوية بالألياف ستكون مؤثرة أكثر، وهذا ميبين في الشكل (12-5-ب)، شكل موقع الإجهاد المحوري عندما تكون $l < l_c$ عند تسليط الإجهاد سيكون مساوياً الى صلابة الليفة .الشكل (12-5-ج) يبين شكل موقع الألياف للطول $l > l_c$.

في الألياف التي تكون فيها $l \ll lc$ (عادة $15lc < l$) يعبر عنها بالألياف المستمرة (Continuous)؛ الألياف الغير مستمرة أو القصيرة تمتلك أطوالاً أقصر من هذه. في الألياف القصيرة التي طولها أقل بكثير من lc ، فإن الطور الأساس سيثوبه حول الليفة بطريقة بحيث سوف لن يكون هنالك انتقالاً للاجهادات وستحدث تقوية بسيطة بالمادة المركبة. ان هذه ستكون مماثلة للتقوية بالدقائق التي اشرنا إليها سابقاً. لكي تكون الألياف مؤثرة بشكل فعال و مميز على الصلابة في المواد المركبة، فإنها يجب ان تكون أليافاً مستمرة.

12-5-2 تأثير اتجاهات و تركيز الألياف

ان ترتيب أو اتجاهات الألياف نسبة بعضها البعض، تركيز الألياف، وتوزيعها كلها لها تأثير مميز على الصلابة و على الخواص الأخرى للمواد المركبة المقواة بالألياف. فبالنسبة للاتجاهات، هنالك حدان محتملان؛ (1) اصطفاف متوازي للمحور الطولي للألياف باتجاه واحد و (2) اصطفاف عشوائي بالكامل. الألياف المستمرة تكون في العادة مصطفة (شكل 12-6-أ)، بينما الألياف القصيرة ربما تكون مصطفة (شكل 12-6-ب)، او موجهة عشوائياً (شكل 12-6-ج)، أو جزئياً مصطفة. نحصل على أفضل خواص للمواد المركبة عندما تكون الألياف موزعة بشكل منتظم.

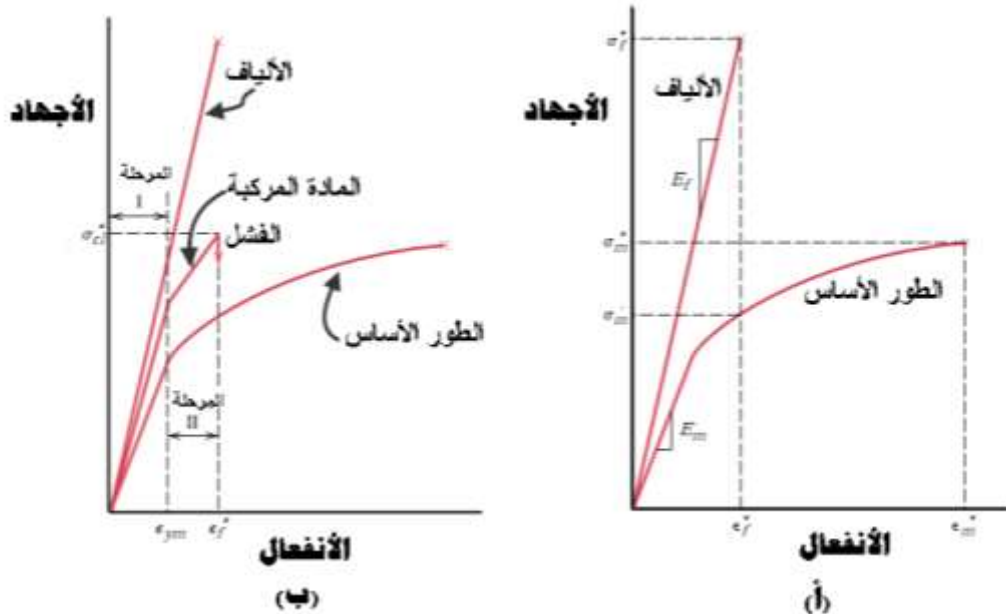


شكل (12-6) رسم تخطيطي (أ) ألياف مستمرة (طويلة) ومصطفة باستقامة واحدة، (ب) ألياف غير مستمرة (قصيرة) و (ج) ألياف غير مستمرة وموجهة عشوائياً في مادة مركبة مقواة بالألياف.

3-5-12 الألياف المستمرة والمصطفة في المواد المركبة 1-3-5-12 سلوك أجهاد الشد-الانفعال بالاتجاه الطولي للتحميل

أن استجابة هذا النوع من المواد المركبة للخواص الميكانيكية ستعتمد على عدة عوامل تتضمن سلوك الإجهاد-الانفعال لكل من الألياف والطور الأساس، النسبة الحجمية للأطوار، وبالإضافة الى ذلك الاتجاه الذي عنده يسلط الحمل. علاوة على ذلك خواص المادة المركبة التي تمتلك الألياف المصطفة ستكون غير متماثلة في جميع الاتجاهات وهذا سيعتمد على الاتجاه الذي سيتم قياسها فيه.

دعنا أولاً نأخذ بنظر الاعتبار سلوك الإجهاد - الانفعال للحالة التي يكون فيها الإجهاد مسط على طول اتجاه الاصطفاف، الاتجاه الطولي، الذي أشرنا إليه في الشكل (12-6-أ). في البدء، سنفرض أن سلوك الإجهاد - الانفعال للألياف والطور الأساس سيكون كالذي مبين تخطيطاً في الشكل (12-7-أ). في هذه المعاملة سوف نعتبر الألياف هشة بالكامل والطور الأساس سيكون مطولي. كذلك اشرنا في هذا الشكل بأن صلابتي الكسر في الشد للألياف والطور الأساس هما σ_m^* و σ_f^* بحسب الترتيب، والانفعالين المناظر لهما هما ϵ_m^* و ϵ_f^* ؛ بالإضافة إلى ذلك سنفرض بأن $\epsilon_f^* < \epsilon_m^*$ ، والتي هي الحالة الطبيعية.



شكل (12-7) (أ) مخطط لمنحنى الإجهاد-الانفعال لألياف هشة ومادة أساس مطولية، لقد أشير الى الإجهادات والانفعالات لكل مادة. (ب) مخطط الإجهاد-الانفعال لمادة مركبة مقواة بالألياف المصطفة باستقامة والمعرضة الى إجهادي أحادي المحور باتجاه اصطفاف الألياف؛ المنحنيات للألياف والطور الأساس المبينان في الجزء (أ) كذلك تم تضمينهما في الرسم.

المادة المركبة المقواة بالألياف والمحتوية على هذه الألياف وهذا الطور الأساس سوف تظهر استجابة الإجهاد - الانفعال الأحادية المحور كالتالي موضحة في الشكل (12-7-ب)؛ لقد تم تضمين سلوك الألياف والطور الأساس من الشكل (12-7-أ) لتزويدنا بمنظور. في المراحل الأولية (المرحلة 1)، فإن كلاً من الألياف والطور الأساس سوف يتشوهان بمرونة؛ عادة هذا الجزء من المنحني يكون شكله خطي. الشائع، لهذا النوع من المواد المركبة، أن الطور الأساس سيخضع وسوف يتشوه بلدونة (عند ϵ_{ym} شكل 12-7-ب) بينما الألياف تستمر بالتمدد بمرونة، لأن صلابة الشد للألياف ستكون أكبر بكثير من صلابة الخضوع للطور الأساس. أن هذه العملية ستستمر إلى المرحلة (2) كما مشار إليها في الشكل، وهي المرحلة التي ستكون عادةً قريبة جداً من الاستقامة، لكن بميل أقل من ميل المرحلة (1). علاوة على ذلك، بالمرور من المرحلة (1) إلى المرحلة (2)، فإن نسبة الحمل المسلط على الألياف سيزداد. أن بداية فشل المواد المركبة سيبدأ عندما يبدأ تصدع الألياف، والذي يناظر تقريباً إلى الانفعال ϵ_f^* كما مشار إليه في الشكل (12-7-ب) أن المادة المركبة ستعشل بشكل كارثي لسببين. الأول، أن جميع الألياف سوف لن تتصدع (تتكسر) في نفس الوقت، لذلك سوف يكون دائماً تغيرات مهمة في صلابة الكسر لمواد الألياف الهشة. بالإضافة إلى ذلك، حتى بعد فشل الألياف، فإن الطور الأساس سيبقى سليماً لأن $\epsilon_m^* < \epsilon_f^*$ (شكل 12-7-أ). لذلك فإن هذه الألياف المتصدعة، والتي ستكون أقصر طولاً من الألياف الأصلية، سوف تكون ما زالت مغمورة ضمن الطور الأساس السليم، وبالتالي ستكون قادرة على تحمل حمل أقل باستمرار تشوه الطور الأساس تشوهاً لدينا.

2-3-5-12 السلوك المرن - التحميل الطولي

Elastic Behavior- Longitudinal Loading

دعنا لأن نهتم بالسلوك المرن للألياف المستمرة والموجهة في المواد المركبة التي تتعرض إلى أحمال باتجاه اصطفاة الألياف. أولاً سنفرض بأن الرابطة البيئية بين الألياف والطور الأساس ستكون قوية جداً، فإن مثل هذا التشوه في كل من الألياف والطور الأساس سيكون متماثلاً (حالة تساوي الانفعالين). تحت مثل هذه الظروف، فإن الحمل الكلي على المادة المركبة F_c سيكون مساوياً إلى الأحمال التي سيتحملها كل من الطور الأساس F_m و طور الألياف F_f أو :

$$F_c = F_m + F_f \dots \dots \dots (4 - 12)$$

من تعريف الإجهاد، فإن $F = \sigma \cdot A$ ، ولذلك فإن التعبير عن F_c ، F_m و F_f بمصطلح الإجهادات (σ_c ، σ_m ، σ_f) والمساحة المقطعية (A_c ، A_m ، A_f) سيكون ممكناً. بتعويض ذلك في المعادلة (4-12) سنحصل على:

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_m \cdot A_m + \sigma_f \cdot A_f \dots\dots\dots (5 - 12)$$

من ثم بقسمة المعادلة (5-12) على المساحة الكلية المقطعية للمادة المركبة A_c سنحصل :

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot \left[\frac{A_m}{A_c} \right] + \sigma_f \cdot \left[\frac{A_f}{A_c} \right] \dots\dots\dots (6 - 12)$$

حيث ان $\left(\frac{A_m}{A_c} \right)$ و $\left(\frac{A_f}{A_c} \right)$ هما نسبتي مساحتي الطور الأساس والطور الليفي، بحسب الترتيب. اذا كان طول المادة المركبة وطول الطور الأساس وطول الألياف متساوياً ، فان $\left(\frac{A_m}{A_c} \right)$ ستكون مساوية الى النسبة الحجمية للطور الأساس V_m ، وكذلك بالنسبة للألياف ، $\left(\frac{A_f}{A_c} \right)$ ستكون مساوية الى النسبة الحجمية للألياف V_f . المعادلة (6-12) ستصبح الآن:

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f \dots\dots\dots (7 - 12)$$

أن الفرضية السابقة التي تنص على ان الانفعال متساوياً ما بين الألياف والطور الأساس تعني:

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \dots\dots\dots (8 - 12)$$

وعندما نقسم كل جزء من المعادلة (7-12) على الانفعال المقابل لها فأن:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} \right) = \left(\frac{\sigma_m}{\epsilon_m} \right) \cdot V_m + \left(\frac{\sigma_f}{\epsilon_f} \right) \cdot V_f \dots\dots\dots (9 - 12)$$

علاوة على ذلك، اذا كانت المادة المركبة والطور الأساس والألياف يتشوهون بمرونة، فان:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} \right) = E_c , \quad \left(\frac{\sigma_m}{\epsilon_m} \right) = E_m , \quad \left(\frac{\sigma_f}{\epsilon_f} \right) = E_f$$

حيث أن (E) هي معامل المرونة للأطوار. نعوض ذلك في المعادلة (9-12) فنحصل على معامل المرونة للمواد المركبة المقواة بالألياف المستمرة، في اتجاه اصطفااف الألياف (أو الاتجاه الطولي)، E_{cl} :

$$E_{cl} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \dots\dots\dots (أ - 10 - 12)$$

$$E_{cl} = E_m \cdot (1 - V_f) + E_f \cdot V_f \dots\dots\dots (ب - 10 - 12)$$

بما ان المادة المركبة ستحتوي على فقط طورين هما الأساسي والألياف ؛ لذلك فإن

$$V_m + V_f = 1$$

لذلك فإن E_{cl} سيكون مساوياً الى معدل النسب الحجمية مضروباً بمعاملي المرونة لكل من الطور الأساس والألياف كل بحسب نسبته.

الخواص الأخرى كالكتافة ستعتمد كذلك على النسب الحجمية ويمكن حسابها بحسب المعادلة التالية:

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \dots\dots\dots (11-12)$$

حيث أن :

ρ_c : كثافة المادة المركبة.

ρ_m : كثافة المادة الأساس.

ρ_f : كثافة المادة المنتشرة.

V_m : النسبة الحجمية للمادة الأساس.

V_f : النسبة الحجمية للمادة المنتشرة.

المعادلة (أ-10-12) هي مناظرة الى المعادلة (1-12) . لكن السابقة تستخدم للمواد المركبة المقواة بالدقائق .

يمكن أن نبين بأنه للتحميل الطولي ،فإن النسبة بين الحمل الذي ستتحمله الألياف الى الذي سيتحمله الطور الأساس هي:

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f \cdot V_f}{E_m \cdot V_m} \dots\dots\dots (12 - 12)$$

- مثال (1-12):** مادة مركبة بألياف زجاجية بأطوال مستمرة ومصطفة باستقامة، تحتوي على % 40 vol من الألياف الزجاجية والتي معامل المرونة لها هو 69 GPa و % 60 vol من راتنج البولي يستير كطور أساس، عند التصلب، ستظهر معامل مرونة مقداره 3.4 GPa.
- أ- احسب معامل المرونة لهذه المادة المركبة في الاتجاه الطولي.
- ب- إذا كانت المساحة المقطعية لها 250 mm² والإجهاد المسلط هو 50 MPa بهذا الاتجاه الطولي، احسب مقدار الحمل الذي سيتحمله كل من الألياف والطور الأساس.
- ج- أوجد الانفعال الذي سيتحمله كل طور عندما يكون الإجهاد المسلط هو في حالة الفرع (ب)

الحل:

أ- معامل المرونة للمادة المركبة يحسب من المعادلة (10-12-أ)

$$E_{cl} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f$$

$$E_{cl} = (3.4 \text{ GPa}) \cdot (0.6) + (69 \text{ GPa}) \cdot (0.4)$$

$$= 30 \text{ GPa}$$

ب- لحل هذا الجزء من المسألة، أولاً يجب أن نجد النسبة بين حمل الألياف الى حمل الطور الأساس، باستخدام المعادلة (11-12)، لذلك:

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f \cdot V_f}{E_m \cdot V_m}$$

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{(69 \text{ GPa}) (0.4)}{(3.4 \text{ GPa}) (0.6)} = 13.5$$

$$F_f = 13.5 F_m \quad \text{أو}$$

بالإضافة الى أن القوة الكلية التي تتحملها المادة F_c يمكن حسابها من الإجهاد المسلط والمساحة المقطعية الكلية للمادة المركبة A_c بموجب المعادلة:

$$F_c = \sigma \cdot A_c = (50 \text{ MPa})(250 \text{ mm}^2)$$

$$= 12,500 \text{ N}$$

على اية حال، هذا الحمل الكلي هو مجموع الأحمال المسلطة على الألياف والطور الأساس والذي هو

$$F_c = F_f + F_m = 12,500 \text{ N}$$

بالتعويض عن قيمة F_f من المعادلة اعلاه فإن المعادلة السابقة ستصبح

$$13.5F_m + F_m = 12,500 N$$

$$F_m = 860 N \text{ او}$$

$$F_f = 13.5 F_m = 13.5 * 860 = 11,640 N$$

لذلك فإن طور الألياف سيتحمل الجزء الأعظم من الحمل المسلط .

ج- يجب أولاً حساب الإجهادات على كل من طور الألياف والطور الأساس.

لحسابات الإجهاد و المساحة المقطعية للطور سيكون من الضروري :

$$A_m = V_m * A_c = (0.6) * (250 \text{ mm}^2) = 150 \text{ mm}^2$$

و

$$A_f = V_f * A_c = (0.4) * (250 \text{ mm}^2) = 100 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = \frac{860 N}{150 \text{ mm}^2} = 5.73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} = \frac{11,640 N}{100 \text{ mm}^2} = 116.4 \text{ MPa}$$

أخيراً،فإن الانفعال يحسب من :

$$\epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{5.73 \text{ MPa}}{3.4 \times 10^3 \text{ MPa}} = 1.69 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{116.4 \text{ MPa}}{69 \times 10^3 \text{ MPa}} = 1.69 \times 10^{-3}$$

لذلك نلاحظ أن الانفعال متساوي في كل من الطورين (الألياف-الأساس) وهذا الذي يجب أن يحدث بموجب المعادلة (8-12) التي أشرنا إليها سابقاً.

12-3-3-5- التحميل المحاذي - السلوك المرن

يمكن أن تتعرض المواد المركبة المقواة بالألياف المستمرة والمصطفة باستقامة الى حمل بالاتجاه المحاذي؛ وهذا هو الحمل المسلط بزوايا 90° مع اتجاه اصطفاف الألياف كما مبين في الشكل (80) . في هذه الحالة فإن الاجهاد (σ) الذي ستعرض له المادة المركبة وكذلك الطور المنتشر (الألياف) والطور الأساس سيكون متساوي أو

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \dots \dots \dots (12 - 13)$$

ان هذا المصطلح يعبر عنه بحالة الإجهاد المتساوي (Isostress state) . كذلك فإن الانفعال أو التشوه للمادة المركبة ككل ϵ_c سيكون :

$$\epsilon_c = \epsilon_m \cdot V_m + \epsilon_f \cdot V_f \dots \dots \dots (14 - 12)$$

لكن بما ان $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ فإن :

$$\frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} * V_m + \frac{\sigma}{E_f} * V_f \dots \dots \dots (15 - 12)$$

حيث ان E_{ct} هو معامل المرونة في الاتجاه المحاذي والآن بقسمة المعادلة (15-12) على (σ) نحصل على :

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} = \frac{V_f}{E_f} \dots \dots \dots (16 - 12)$$

والتي يمكن أختصارها الى

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m} \dots \dots \dots (17 - 12)$$

المعادلة (17-12) ستكون مناظرة إلى معادلة الحد الأدنى للمواد المركبة المقواة بالدقائق ، المعادلة (2-12).

مثال (2-12) : احسب معامل المرونة للمادة المركبة الموصوفة في المثال (1-12) ، لكن افرض

ان الإجهاد سيسلط عموديا على اتجاه اصطفاف الألياف .

الحل :

بموجب المعادلة (17-12) فان :

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m}$$

$$E_{ct} = \frac{(3.4 \text{ GPa}) * (69 \text{ GPa})}{(0.6)(69 \text{ GPa}) + (0.4)(3.4 \text{ GPa})}$$

$$=5.5 \text{ GPa}$$

هذه القيمة لـ E_{ct} هي أكبر قليلاً من قيمة E_m لكن من المثل (1) فرع (أ) ، فقط تقريباً خمس معامل المرونة على طول الألياف (E_{cl}) ، وهذا يشير الى درجة عدم التماثل (Anisotropy) للمواد المركبة المقواة بالألياف المستمرة والمصطفة.

12-3-4-5-3-4 صلابة الشد في الاتجاه الطولي

الآن سنأخذ بنظر الاعتبار خصائص الصلابة للمواد المركبة المقواة بالألياف المستمرة والمصطفة والمحملة بالاتجاه الطولي. تحت مثل هذه الظروف، عادة ما تكون الصلابة كأقصى أجهاد على مخطط الإجهاد . الانفعال ، شكل (12-7-أ) ؛ غالباً ما تمثل هذه النقطة تصدع الألياف ، وتحدد بدايته فشل المادة المركبة. الجدول (12-1) يدرج قيم صلابة الشد الشائعة بالاتجاه الطولي لثلاث مواد مركبة مقواة بالألياف والأكثر شيوعاً . الفشل لهذا النوع من المواد المركبة هي عملية معقدة نسبياً، وهناك أنماط مختلفة للفشل يمكن حدوثها. ان شكل النمط الذي سيحدث للمادة المركبة المحددة سوف يعتمد على خواص الألياف والطور الأساس وعلى طبيعة وصلابة الروابط البينية بين الألياف والطور الأساس.

جدول (12-1) الصلابات الشائعة في الاتجاهين الطولي والمحاذي لثلاث أنواع من المواد المركبة المقواة بالألياف الأحادية الاتجاه. النسبة الحجمية للألياف في كل مادة تقريباً 50%.

المادة	صلابة الشد بالاتجاه الطولي (MPa)	صلابة الشد بالاتجاه المحاذي (MPa)
ألياف زجاجية-بولي يستير	700	20
ألياف كربونية (ذو معامل مرونة عالي)-أيبوكسي	1000	35
ألياف كيفلير-أيبوكسي	1200	20

إذا فرضنا بأن $\epsilon_f^* < \epsilon_m^*$ (شكل 12-7-أ)، وهي الحالة الاعتيادية، فان الألياف ستتهار قبل الطور الأساس. فحالما يحدث التصدع في الألياف، فإن اغلب الحمل الذي كانت تتحمله الألياف سيتحول الآن إلى الطور الأساس. إذا كانت الحالة هذه ، فانه من المحتمل ان نتبنى معادلة للإجهاد على هذا النوع من المواد المركبة، المعادلة (12-7) ، إلى العلاقة التالية للصلابة بالاتجاه الطولي للمواد المركبة σ_{cl}^*

$$\sigma_{cl}^* = \sigma'_m(1 - V_f) + \sigma_f^* V_f$$

حيث أن σ'_m هو الاجهاد في الطور الاساس الذي يحدث عنده فشل الألياف (كما موضح في الشكل 12-7-أ). وكما أشرنا سابقاً σ_f^* هي صلابة الشد للألياف.

5-3-5-12 صلابة الشد بالاتجاه المحاذي

الصلابة في المواد المركبة المقواة بالألياف المستمرة ذات الاتجاه الواحد ستكون غير متماثلة بدرجة كبيرة، ومثل هذه المادة المركبة ستكون مصممة عادةً لكي تتحمل الصلابة الأعلى، بالاتجاه الطولي. ولكن خلال الخدمة العملية ربما ستتواجد كذلك أحياناً بالاتجاه المحاذي، تحت مثل هذه الظروف، فأن الفشل المبكر ربما سينتج نتيجة لكون الصلابة بالاتجاه المحاذي عادةً جداً منخفضة. فهي في بعض الأحيان تكون أقل من صلابة الشد للطور الأساس. لذلك، في الحالات الحقيقية، تأثير التقوية للألياف سيكون سلبياً. ان صلابة الشد الشائعة للمواد المركبة المقواة بألياف الموحدة الاتجاه مبينة في الجدول (1-12). ان الصلابة بالاتجاه الطولي تتحكم فيها صلابة الألياف ، إلا ان هنالك عوامل كثيرة سوف يكون لها تأثير مميز على الصلابة في الاتجاه المحاذي . ان هذه العوامل تشمل الخواص لكل من الألياف والطور الأساس، صلابة الترابط بين الألياف والطور الأساس، ووجود الفجوات (voids). من المحاولات التي تم تطبيقها لتحسين الصلابة بالاتجاه المحاذي لهذه المواد المركبة عن طريق تعديل خواص الطور الأساس.

المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة المصطفة

حتى ولو كانت الفكرة بأن كفاءة التقوية ستكون أقل بالنسبة للألياف القصيرة بالمقارنة مع الألياف الطويلة (المستمرة) ، إلا أن المواد المركبة المقواة بالألياف الصغيرة والمصطفة شكل (12-6-ب) قد أصبحت ذات أهمية متزايدة في الأسواق التجارية. فالألياف الزجاجية المقطّعة تستخدم بكثرة ؛ كذلك الحال مع الألياف القصيرة الكربونية والأرامية (كيفيلير) فهي تستخدم كذلك.

ان المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة يمكن أن تظهر معامل مرونة لغاية 90% وصلابة شد قد تصل لغاية 50%، من قيم المواد المركبة التي تستخدم الألياف المستمرة في التقوية. للمواد المركبة والمقواة بالألياف القصيرة والمصطفة التي تمتلك توزيعاً منتظماً للألياف والتي فيها $l > l_c$ والصلابة في الاتجاه الطولي (σ_{cd}^*) يمكن ان نعبر عنها بالمعادلة التالية :

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma'_m(1 - V_f) \dots \dots \dots (18 - 12)$$

حيث ان σ_f^* و σ'_m يمثلان ، بحسب الترتيب ، صلابة التصدع للألياف وصلابة الطور الأساس المناظرة، عند فشل المادة المركبة (شكل 12-7-أ).

إذا كانت أطوال الألياف أقل من الطول الحرج ($l < l_c$) فإن الصلابة بالاتجاه المحاذي σ'_{cd} سوف يعبر عنها بالمعادلة التالية :

$$\sigma'_{cd} = \frac{l \tau_c}{d} \cdot V_f + \sigma'_m (1 - V_f) \dots \dots \dots (19 - 12)$$

حيث ان (d) هي قطر الألياف و τ_c هي القيمة الأقل من أما (روابط الألياف-الطور الأساس) أو (صلابة القص للطور الأساس) .

6-3-5-12 المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة العشوائية الاتجاهات عادة عندما تكون اتجاهات الألياف عشوائية نستخدم أليافاً قصيرة ؛ ان التقوية لهذا النوع مبينة بالرسم التخطيطي في الشكل (12-7-ج) . تحت مثل هذه الظروف، فإن قانون الخلط المعبر عن معامل المرونة يكون مماثل للمعادلة (12-10-أ) و يمكن الاستفادة منه كما يلي :

$$E_{cd} = K E_f V_f + E_m V_m \dots \dots \dots (20 - 12)$$

حيث ان k تمثل مؤشر كفاءة الألياف، والذي يعتمد على V_f والنسبة E_f/E_m . بالطبع ان قيمته سوف تكون اقل من (1) ، عادةً في المدى (0.6-0.1). لذلك فان التقوية بالألياف العشوائية (كما في حالة الموجهة) ، سيزداد معامل المرونة ببعض التناسب مع النسبة الحجمية للألياف.

الجدول (12-2) الذي يعطي بعض الخواص الميكانيكية للبولي كربونيت الغير مقوى والمقوى بالألياف الزجاجية القصيرة العشوائية الاتجاهات سيزودنا بفكرة حول قيمة التقوية الممكنة. بالخلاصة يمكننا القول بأن المواد المركبة المقواة بالألياف المصطفة ستكون أصلاً غير متماثلة الخواص ، بطريقة بحيث ان الصلابة القصوى والتقوية ستتجز على طول الاصطفاغ (الاتجاه الطولي). أما في الاتجاه المحاذي، ستكون التقوية بالألياف غير موجودة عملياً. يمكن ان يحدث التصدع عادةً عند إجهادات شد منخفضة نسبياً. ان الإجهادات في الاتجاهات الأخرى ، ستكون فيها قيمة الصلابة للمادة المركبة ما بين القيمتين (بالاتجاه الطولي والمحاذي) . ان كفاءة التقوية للألياف لحالات عديدة مبينة في الجدول (12-3). ان هذه الكفاءة تؤخذ بالوحدة (1) للمادة المركبة في الاتجاه الطولي ، وصفرأ في الاتجاه العمودي للألياف.

جدول (12-2) خواص البولي كربونيت الغير مقوى والمقوى بالألياف الزجاجية العشوائية الاتجاهات.

Vol%	بالألياف	التقوية	الخواص	
40	30	20	الغير مقواة	
1.52	1.43	1.35	1.22-1.19	الوزن النوعي
159	131	110	62-59	صلابة الشد (MPa)
11.6	8.62	5.93	2.345-2.24	معامل المرونة (GPa)
5-3	5-3	6-4	115-90	الاستطالة (%)
2.5	2.0	2.0	16-12	صلابة الصدمات (أيزود) (lbf/in.)

عندما تتعرض المادة المركبة الى الإجهادات في الاتجاهات المختلفة خلال مستوى واحد ، فإن هذه الطبقات المصطفة والمثبتة بقوة ببعضها البعض باتجاهات مختلفة سيستفاد منها كثيراً. يطلق على هذه المواد المركبة بالطبقية والتي سنناقشها لاحقاً.

جدول (12-3) كفاءة التقوية بالألياف للمادة المركبة باتجاهات مختلفة للألياف وتطبيقات لأجهادات في اتجاهات مختلفة.

كفاءة التقوية	اتجاه الإجهاد	اتجاه الألياف
1	بالاتجاه الموازي للألياف	جميع الألياف متوازية
0	عمودي على الألياف	
$\frac{3}{8}$	بأي اتجاه في مستوى الألياف (ثنائي الأبعاد)	الألياف موزعة عشوائياً وبتجانس خلال مستوى محدد
$\frac{1}{5}$	بأي اتجاه (ثلاثي الأبعاد)	الألياف موزعة عشوائياً وبتجانس خلال الأبعاد الثلاثة في الفراغ

7-3-5-12 معامل التمدد الحراري في الاتجاه الطولي (موازياً لإصطفاف الألياف)

يمكن استنتاج معادلة معامل التمدد الحراري للمادة المركبة المقواة بالألياف المستمرة بالاتجاه

الطولي بحسب المعادلة التالية:

$$\alpha_{cr} = \frac{(\alpha_m \cdot E_m \cdot V_m + \alpha_f \cdot E_f \cdot V_f)}{(E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f)} \dots \dots \dots (21-12)$$

حيث أن :

α_{cl} : هو معامل التمدد الحراري للمواد المركبة في الاتجاه الطولي.

α_m : هو معامل التمدد الحراري للمادة الأساس.

α_f : هو معامل التمدد الحراري للألياف.

E_m : معامل المرونة للمادة الأساس.

E_f : معامل المرونة للألياف.

12-3-5-8 معامل التمدد الحراري في الاتجاه المحاذي (عمودياً على إصطفاغ الألياف)

يمكن استنتاج معادلة معامل التمدد الحراري للمادة المركبة المقواة بالألياف المستمرة بالاتجاه

المحاذي بحسب المعادلة التالية:

$$\alpha_{ct} = (1 + \mu_m)\alpha_m.V_m + \alpha_f.V_f \dots\dots\dots(12 - 22)$$

حيث أن :

α_{ct} : معامل التمدد الحراري للمواد المركبة في الاتجاه العمودي على الألياف (المحاذي).

μ_m : نسبة بويسون للمادة الأساس.

{نسبة بويسون هي النسبة بين الانفعال المحاذي (العرضي) والانفعال الطولي في اتجاه القوة المسلطة}.

12-3-5-9 معامل الجساءة (Shear Modulus)

يمكن حساب معامل الجساءة للمادة المركبة المقواة بالألياف المستمرة بحسب المعادلة التالية:

$$G_{ct} = \frac{G_f G_m}{(V_f . G_m + V_m G_f)} \dots\dots\dots(12 - 23)$$

حيث أن :

G_f : معامل الجساءة المرنة لمادة الألياف.

G_m : معامل الجساءة المرنة للمادة الأساس.

12-3-5-10 نسبة بويسون (Poisson's Ratio)

يمكن استخدام قانون مناظر لقانون معامل المرونة (المعادلة 10-12-أ) لحساب نسبة بويسون للمادة المركبة.

$$\mu_c = V_f \mu_f + V_m \mu_m \dots\dots\dots(24 - 12)$$

حيث أن :

μ_c : نسبة بويسون للمادة المركبة.

μ_f : نسبة بويسون لمادة الألياف.

μ_m : نسبة بويسون لمادة الأساس.

أسئلة الفصل

- (1) وضح الفوارق العامة في آلية التقوية بين الدقائق الكبيرة والدقائق الصغيرة (التقوية بالتشتيت) في المواد المركبة المقواة بالدقائق.
- (2) إذا رغبتنا في تحسين الخواص الميكانيكية للألمنيوم وذلك عن طريق استخدام دقائق ناعمة من أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) ، وكان معامل المرونة للألمنيوم مقداره 69 GPa ولأكسيد الألمنيوم هو 393 GPa. أرسم العلاقة ما بين معامل المرونة والنسبة المئوية الحجمية لدقائق أكسيد الألمنيوم من صفر لغاية 100% مستخدماً معادلتَي الحديد الأقصى والأدنى.
- (3) خمن القيمة الأقصى والأدنى لقيمة الموصلية الحرارية للسيرميت الذي يتكون من 85 vol% من دقائق كربيد التيتانيوم (TiC) المقوية للكوبالت كمادة أساس. أفرض أن الموصلية الحرارية لكربيد التيتانيوم هي 27 W/m-K وللكوبالت هي 69 W/m-K.
- (4) إذا رغبتنا في تحضير مادة مركبة تتألف من دقائق كبيرة من التنجستون داخل طور أساس نحاسي، وكانت النسبة الحجمية للتنجستون هي 0.6 وللنحاس 0.4 ، توقع الحد الأعلى للصلابة النوعية (الجساءة النوعية) لهذه المادة المركبة مستعيناً بالجدول أدناه:

المادة	الوزن النوعي	معامل المرونة (GPa)
النحاس	8.9	110
التنجستون	19.3	407

- (5) أ- للمادة المركبة المقواة بالألياف، كفاءة تقوية مقدارها (η) وتعتمد على طول الألياف بحسب المعادلة التالية:

$$\eta = \frac{l - 2x}{l}$$

حيث أن (x) تمثل طول الألياف في كل نهاية والذي لا يساهم في نقل الحمل. أرسم العلاقة ما بين η و l لغاية ($l = 40 \text{ mm}$) فافرضاً أن ($x = 0.75 \text{ mm}$).

ب- ما هو الطول المطلوب للحصول على كفاءة تقوية مقدارها 80%.

(6) مادة مركبة مقواة بألياف مستمرة ومصطفة باستقامة واحدة يتألف % 30 vol من ألياف الأراميد كطور مقوي و %70 vol من البولي كربونيت كطور أساس؛ الخصائص الميكانيكية لهذين الطورين هي كما يلي:

المادة	معامل المرونة (GPa)	صلابة الشد (MPa)
ألياف الأراميد	131	3600
البولي كربونيت	2.4	65

كذلك كانت قيمة الصلابة للبولي كربونيت عند فشل الألياف هي 45 MPa. لهذه المادة المركبة أحسب:

أ- صلابة الشد الطولية (بالاتجاه الطولي للألياف)؛

ب- معامل المرونة الطولي (بالاتجاه الطولي للألياف).

(7) اذا كان معامل المرونة للمادة المركبة المقواة بالألياف المستمرة والمصطفة باستقامة واحدة طولياً 19.7 GPa وبالالاتجاه المحاذي (العمودي على طول الألياف) 3.66 GPa. واذا علمت

ان النسبة الحجمية للألياف هي 25% ، أوجد معامل المرونة للألياف والمادة الأساس؟

(8) للمادة المركبة اللدائنية التي تتألف من الألياف الزجاجية المستمرة والمصطفة باستقامة واحدة والتي مادتها الأساس تتكون من النايلون 6,6 ، اذا كانت الألياف تتحمل 94% من الحمل المسلط بالاتجاه الطولي.

أ- أستخدم البيانات المزودة لحساب النسبة الحجمية المطلوبة للألياف في هذه الحالة.

ب- ما هي صلابة الشد لهذه المادة المركبة؟ أفرض ان صلابة المادة الأساس عند فشل

الألياف ستكون 30 MPa.

المادة	معامل المرونة (GPa)	صلابة الشد (MPa)
ألياف الزجاج	72.5	3400
نايلون 6,6	3.0	76

(9) أفرض أن المادة المركبة الموصوفة بالمسألة(6) لها مساحة مقطعية مقدارها 320 mm^2 ومعرضة الى حمل بالاتجاه الطولي مقداره 44500 N؛

أ- أحسب نسبة الحمل بين الألياف والمادة الأساس؛

ب- أحسب الحمل الحقيقي الذي سيتحمله كل من الألياف والمادة الأساس؛

ج- أحسب قيمة الإجهاد المسلط على كل من الألياف والمادة الأساس؛

- د- ما هو مقدار الانفعال الذي ستتعرض له هذه المادة المركبة.
- (10) مادة مركبة مقواة بألياف مستمرة ومصطفة باستقامة واحدة وتمتلك مساحة مقطعية مقدارها 1130 mm^2 ومعرضة الى قوة شد خارجية. اذا كان الأجهاد الذي تتعرض له كل من الألياف والمادة الأساس هو 156 MPa و 2.75 MPa بحسب الترتيب؛ وكانت القوة التي يتحملها طور الألياف هي $74,000 \text{ N}$ والانفعال الطولي الكلي هو 1.25×10^{-3} ، أوجد:
- أ- القوة التي سيتحملها الطور الأساس؛
- ب- معامل المرونة للمادة المركبة في الاتجاه الطولي.
- ج- معامل المرونة لكل من الألياف والطور الأساس.
- (11) أحسب الصلابة في الاتجاه الطولي لمادة مركبة طورها الأساس هو الأيبيوكسي ومقواة بألياف كربونية مصطفة باستقامة واحدة، اذا كانت النسبة الحجمية للألياف 25% مستخدماً المعلومات التالية:

1. معدل أقطار الألياف هو $10 \times 10^{-3} \text{ mm}$.

2. معدل طول الألياف هو 5 mm .

3. صلابة التصدع للألياف هي 2.5 GPa .

4. صلابة الرابطة بين الألياف والمادة الأساس هي 80 MPa .

5. صلابة المادة الأساس عند فشل الألياف هي 10 MPa .

6. صلابة الشد للمادة الأساس هي 75 MPa .

- (12) اذا كان المطلوب انتاج مادة مركبة طورها الأساس من الأيبيوكسي ومقواة بألياف الكربون المصطفة باستقامة واحدة بحيث تمتلك صلابة شد في الاتجاه الطولي مقدارها 750 MPa . أحسب النسبة المئوية الحجمية للألياف الضرورية اذا كان:

أ- معدل قطر الألياف هو $1.2 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ومعدل أطوالها 1 mm .

ب- صلابة التصدع للألياف هي 5000 MPa .

ج- صلابة رابطة الألياف بالمادة الأساس هي 25 MPa .

د- صلابة المادة الأساس عند فشل الألياف هي 10 MPa .

- (13) أحسب صلابة الشد بالاتجاه الطولي للمادة المركبة التي طورها الأساس هو الأيبيوكسي والمقواة بالألياف الزجاجية المصطفة باستقامة واحدة والتي معدل أقطارها 0.01 mm ومعدل أطوالها 2.5 mm ، والنسبة المئوية الحجمية للألياف هي 40%. مستخدماً المعلومات التالية:

أ- صلابة الترابط بين الألياف والمادة الأساس هي 75 MPa .

ب- صلابة التصدع للألياف هي 3500 MPa .

ج- صلابة المادة الأساس عند فشل الألياف هي 8 MPa .

14) أذكر خاصية واحدة مرغوبة وأخرى غير مرغوبة لكل حالة من الحالات التالية للمواد المركبة المقواة ب:

أ- ألياف قصيرة-موجهة

ب- ألياف قصيرة-عشوائية الاتجاه

15) أشتق معادلة عامة مناظرة للمعادلة (12-16) لمعامل المرونة بالاتجاه المحاذي لمادة مركبة هجينة مقواة بنوعين من الألياف المستمرة والمصطفة باستقامة واحدة.

الفصل الثالث عشر:

المواد المركبة المعدنية (التي أساسها المعدن) Metal Matrix Composites (MMC)

1-13 مقدمة

بموجب التصنيف للمواد المركبة فإن المواد المركبة التي أساسها المعدن هي مواد تتألف من مادة أساس معدنية مركبة مع إما مادة سيراميكية (أكاسيد أو كبريتيدات)، أو معدنية (رصاص، تنجستون، موليبدنيوم) كطور منتشر. ان المعادن التي تستخدم كأطواراً أساسية في المواد المركبة تكون عادةً معادن مطولية. ان هذه المواد يمكن الاستفاده منها في التطبيقات التي تتطلب درجات حرارية أعلى من درجات الخدمة الأعلى لنظائرها من المواد الأساسية، علاوة على ذلك فان التقوية هذه ربما ستحسن من الجساءة النوعية، الصلابة النوعية، مقاومة الاحتكاك، مقاومة الزحف، الموصلية الحرارية وأستقرارية الأبعاد.

هنالك بعض المميزات لهذا النوع من المواد الأساسية كتفوقها على المواد اللدائنية المركبة بتحملها درجات حرارية أعلى، مقاومة الأشتعال، ومقاومة أعظم ضد التضرر بالموائع العضوية. أن الأطوار الأساسية المعدنية هي أعلى ثمناً من الأطوار اللدائنية ولذلك فهي بعض الشيء محدودة الاستخدام.

السبائك الفائقة (السوبر)، بالإضافة الى سبائك الألمنيوم والمغنيسيوم، التيتانيوم، والنحاس قد تم استخدامها كأطوار أساسية معدنية. أن التقوية هنا يمكن ان تكون بالدقائق، بالألياف المستمرة أو القصيرة، بالشعيرات؛ ونسبها الحجمية يكون عادة ما بين 10-60 vol%. أن المواد التي تصنع منها الألياف المستمرة تتضمن الكربون، كربيد السليكون، البورون، الألومينا، والمعادن الحرارية. أما المواد التي تصنع منها الشعيرات والألياف القصيرة وتستخدم في تقوية المعادن فهي شعيرات كربيد السليكون والألياف القصيرة المصنوعة من الألومينا والكربون، ودقائق كربيد السليكون والألومينا. السيرميت يقع ضمن مجموعة الأطوار الأساسية المعدنية.

الجدول (1-13) يبين بعض الخواص لمجموعة شائعة من الأطوار الأساسية المعدنية، المقواة بالألياف المستمرة والمصطفة بأستقامة .

أن بعض التوليفات للطور الأساسي مع الطور الثانوي (المقوي) ستكون فعاليتها عالية عند الاستخدام في درجات الحرارة العالية. وكنتيجة لذلك فإن المادة المركبة ستتضرر ربما بسبب عمليات التصنيع لهذه المواد عند درجات الحرارة العالية، أو نتيجة لتعرضها الى الحرارة العالية أثناء الخدمة. لقد تمت معالجة هذه المشكلة عادةً بأما طلاء المادة المقوية بطبقة طلاء أو بأجراء تعديل على تركيب السبيكة المعدنية المكونة للطور الأساس.

غالباً ما تتضمن عمليات تصنيع المواد المركبة المعدنية على الأقل خطوتان: التجميد أو التركيب الأصبطناعي (Synthesis) (ادخال الطور المقوي داخل الطور الأساس)، يتبعها عملية تشكيل. هنالك مجموعة كبيرة من تقنيات التجميد المتوفرة، البعض منها متطورة نسبياً؛ المواد المركبة المعدنية المقواة بالألياف القصيرة المطواعة يتم تشكيلها بتقنيات تشكيل المعادن الأساسية (كالحدادة، البثق، والدرفلة). حالياً، قدم بعض مُصنعي المركبات أجزاءً من المحركات التي تتضمن طوراً أساسياً من الألمنيوم المقوي [الياف الألومينا والكربون؛ هذه المواد المركبة المعدنية ستكون خفيفة الوزن وستقاوم البلى والتشوهات الحرارية.

جدول(1-13) خواص مجموعة من المواد المركبة المعدنية المقواة بألياف مستمرة ومصطفة بأستقامة.

الألياف	الطور الأساس	المحتوى الليفي (vol%)	الكثافة (g/cm ³)	معامل المرونة بالاتجاه الطولي (GPa)	صلابة الشد بالاتجاه الطولي (MPa)
الكربون	6061 Al	41	2.44	320	620
البورون	6061 Al	48	-	207	1515
كربيد السليكون	6061 Al	50	2.93	230	1480
الألومينا	380.0 Al	24	-	120	340
الكربون	AZ31 Mg	38	1.83	300	510

أن التطبيقات الفضائية في مجال الانشاءات تضمن استخدام سبائك الألمنيوم المتطورة كطور أساسي؛ واستخدام ألياف البورون كطور مقوي في صناعة متتبع المكوك الفضائي، وألياف جرافيتية مستمرة في صناعة أغلفة المناظير (التلسكوب).

ان الزحف والكسر عند درجات الحرارة العالية لبعض السبائك الفائقة (نيكل-كوبلت-أساس السبائك) ربما يمكن تعزيزهما بالتقوية بالألياف عن طريق استخدام معادن حرارية كالتنجستون. يمكن المحافظة على مقاومة التأكسد عند درجات الحرارة العالية ومقاومة الصدمات

كذلك. أن التصاميم التي تدمج هذه المواد المركبة ستسمح باستخدامها عند درجات حرارية أعلى وبكفاءة أفضل عند استخدامها في المحركات التوربينية.

2-13 المواد المركبة المعدنية التي أساسها الألمونيوم

Aluminum Matrix composite (AMC)

هذه هي مجموعة كبيرة من المواد المركبة التي أساسها المعدن. فالمادة الأساس تكون عادة سبائك الألمونيوم - السليكون ومسلسلات السبائك 2xxx و 6xxx.

يتم تقوية مادة الألمونيوم كمادة أساس عند استخدامها في المواد المركبة كما يلي:

1- رقائق الألمونيوم (أو أكسيد الألمونيوم) (Al_2O_3) أو كربيد السليكون (SiC) (كمواد مركبة مقواة بالدقائق) والنسبة الحجمية تكون ما بين 15 - 70 %.

2- ألياف مستمرة من الألومينا، كربيد السليكون، الجرافيت (كمواد مركبة مقواة بالألياف الطويلة).

3- ألياف قصيرة من الألومينا (كمواد مركبة مقواة بالألياف القصيرة).

ويتم تصنيع المواد المركبة التي أساسها الألمونيوم بالتقنيات التالية:

1) ميتالورجيا المساحيق (التلبيد) Powder Metallurgy (Sintering)

2) الصب بالتحريك (Stir casting)

3) الترشيح (Infiltration)

1-2-13 خواص المواد المركبة التي أساسها الألمنيوم

هذه هي أهم الخواص الشائعة لهذه المواد:

1- الصلابة العالية حتى عند درجات الحرارة العالية.

2- الصلابة العالية (معامل المرونة).

3- الكثافة المنخفضة.

4- الموصلية الحرارية العالية.

5- مقاومة ممتازة للاحتكاك.

يستخدم هذا النوع من المواد المركبة في تصنيع أجزاء المركبات (المكابس، أذرع الدفع،

مكونات المكابح، دوار المكابح للقطارات الفائقة السرعة، الدراجات الهوائية، نوادي القولف،

الأجزاء الإلكترونية، قلوب الكوابل ذات الفولتية العالية.

3-13 المواد المركبة المعدنية التي أساسها المغنيسيوم**Magnesium Matrix composite**

يتم تقوية المواد المركبة التي أساسها المغنيسيوم بصورة رئيسية باستخدام دقائق كربيد السليكون (SiC) (المواد المركبة المقواة بالدقائق).

خواص المواد المركبة التي أساسها المغنيسيوم:

- 1- الكثافة المنخفضة.
- 2- الصلابة العالية (معامل المرونة).
- 3- مقاومة عالية للبلل.
- 4- صلابة عالية حتى في درجات الحرارة العالية.
- 5- مقاومة جيدة للزحف.

تستخدم هذه المواد في صناعة أجزاء سيارات السباق، أنظمة المكابح الخفيفة الوزن، أجزاء الطائرات مثل صندوق التروس، نقل الحركة، الضواغط والمكائن.

4-13 المواد المركبة المعدنية التي أساسها التيتانيوم**Titanium Matrix composite**

يتم تقوية المواد المركبة التي أساسها التيتانيوم بصورة رئيسية بما يلي:

- 1- ألياف طويلة (أحادية الليفة) مصنوعة من كربيد السليكون (مواد مركبة مقواة بألياف طويلة).
 - 2- دقائق بوريد التيتانيوم (TiB_2) وكربيد التيتانيوم (TiC) (مواد مركبة مقواة بالدقائق).
- تستخدم تقنية ميتالورجيا المساحيق (التلييد) كأحد الطرائق الشائعة في تصنيع هذا النوع من المواد المركبة.

1-4-13 خواص المواد المركبة التي أساسها التيتانيوم

- 1- الصلابة العالية.
- 2- الصلابة العالية (معامل المرونة).
- 3- مقاومة جيدة للزحف.
- 4- استقرارية حرارية عالية.
- 5- مقاومة عالية للبلل.

يستخدم هذا النوع من المواد المركبة في صناعة مركبات هيكل الطائرة النفاثة الأمريكية F-16، أجزاء المحركات التوربينية (أرياش المراوح، المكابح، حلقات التزامن (Synchronization)

(rings)، وصلات الاتصال، المحاور، الأقراص)، مكونات محركات المركبات، أجزاء القيادة في القطارات، مكونات المحركات العامة.

13-5 المواد المركبة المعدنية التي أساسها النحاس (Copper Matrix Composite)

وتقوى هذه المواد عادة بالمواد التالية:

- 1- ألياف الكربون المستمرة (C)، ألياف كربيد السليكون (SiC)، ألياف التنجستون (W)، وألياف الصلب المقاوم للصدأ 304 (مواد مركبة مقواة بالألياف الطويلة).
 - 2- دقائق كربيد السليكون (المواد المركبة المقواة بالدقائق).
- إن الطرائق الشائعة في تصنيع هذا النوع من المواد المركبة هما ميتالورجيا المساحيق والترشيح.

ان أهم خواص المواد المركبة المعدنية التي أساسها النحاس هي:

- 1- معامل التمدد الحراري المنخفض.
 - 2- الصلابة العالية.
 - 3- الموصلية الكهربائية العالية.
 - 4- الموصلية الحرارية العالية.
 - 5- مقاومة البلى الجيدة.
- يستخدم هذا النوع من المواد المركبة في صناعة النماذج المهجنة، المرحلات الإلكترونية، النوابض الموصلة كهربائية، والأجزاء الإلكترونية الأخرى.

13-6 طرائق تصنيع المواد المركبة المعدنية

وتتضمن الطرائق التالية:

13-6-1 طريقة الحالة السائلة (Liquid State Fabrication Method)

وتتضمن هذه الطريقة انتشار الطور المنتشر في الطور الأساسي الذي يكون عبارة عن منصهر معدني تتبعه عملية التجمد.

فمن أجل الحصول على خواص ميكانيكية جيدة للمادة المركبة، يجب أن تكون هنالك قوى ترابط بينية سطحية (الترطيب) قوية بين الطور المنتشر والطور الأساسي السائل. يمكن ربما تحسين الترطيب (Wetting) بطلاء الدقائق أو الألياف للمادة المنتشرة، إن الطلاء سوف لن يقلل الطاقة السطحية فحسب بل سيعمل كذلك على منع التفاعل الكيميائي بين الطور المنتشر والمادة الأساسي.

تتضمن طرائق الحالة السائلة المستخدمة في تصنيع المواد المركبة التقنيات التالية:

1-1-6-13 السباكة بالخلط (Stir Casting)

وهي طريقة يتم فيها انتشار الطور (دقائق سيراميكية، ألياف قصيرة) وخلطه مع المعدن الأساس المصهور باستخدام خلاط ميكانيكي.

هذه الطريقة هي الأبسط والأكثر اقتصادية من جميع أنواع الطرق الأخرى للحالة السائلة. المادة السائلة للمادة المركبة يتم سباكتها بإحدى تقنيات تشكيل المعادن. السباكة بالخلط تتميز بالخصائص التالية:

1- المحتوى الحجمي للطور المنتشر يكون محدود (عادة ليس أكثر من 30 vol%).

2- توزيع الطور المنتشر خلال الطور الأساسي سوف لن يكون متجانس بالتحام وسينتج عن ذلك:

أ. سوف يكون هنالك تجمعات عنقودية للطور المنتشر (رقائق أو ألياف)..

ب. سيحدث فصل نتيجة الجاذبية للطور المنتشر نتيجة لاختلاف الكثافات بين الطور المنتشر والطور الأساسي.

3- تعتبر هذه التقنية من التقنيات البسيطة والمنخفضة التكلفة.

ربما يمكننا تحسين المواد المركبة المعدنية المخلوطة بالحالة شبه الصلبة تسمى بالسباكة المعجلة (Rheocasting). الزوجة العالية للمادة الأساس سبه الصلبة ستمكنا من الحصول على تخليط أفضل للطور المنتشر.

2-1-6-13 الترشيح (Infiltration)

الترشيح هو أحد طرائق الحالة السائلة في تصنيع المواد المركبة والتي فيها يتم تغميس الطور المنتشر (رقائق سيراميكية، ألياف، نسيج) في المادة الأساس التي هي في شكل منصهر معدني حيث ستملاً الفراغات بين متضمنات الطور المنتشر.

القوة المحفزة لعملية الترشيح هي إما القوى الشعرية (Capillary force) للطور المنتشر (الترشيح التلقائي) أو ضغط خارجي (غازي، ميكانيكي، إلكترومغناطيسي، قوة طرد مركزية أو قوة فوق صوتية) تسلط على الأساس السائل (الترشيح بالقوة).

الترشيح هو إحدى الطرائق التي تستخدم في تحضير المادة المركبة المؤلفة من التتجستون - النحاس.

الخطوات الرئيسية لهذه التقنية هي كما يلي:

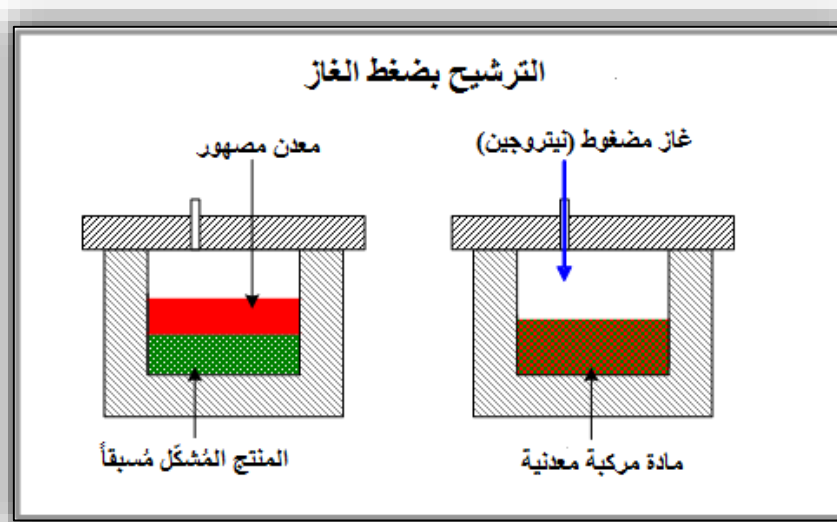
1- تحضير مسحوق من التتجستون بمعدل حجم دقائق في حدود 1- 5 مايكرون.

2- خطوة اختيارية: طلاء المسحوق بالنيكل. المحتوى الكلي للنيكل في حدود 0.04 %.

- 3- خلط مسحوق التنجستون مع مادة رابطة لدائنية.
- 4- خلط مسحوق التنجستون بطرائق القولبة (الحقن، الكبس بالقوالب، الضغط الأيزوستاتيكي). الكبس يجب أن يزودنا بمستوى المسامية المطلوبة (الكثافة الظاهرية) للبنية الهيكلية للتنجستون.
- 5- إذابة المادة الرابطة (اللدائن).
- 6- تلييد المكبوس الأخضر عند درجة حرارة ($1204 - 1315 \text{ C}^\circ$) بمحيط الهيدروجين لمدة 2 ساعة.
- 7- وضع الجزء الملبد على صفيحة نحاسية (مسحوق) في فرن الترشيح - التلييد.
- 8- ترشيح البنية الملبدة المسامية للتنجستون مع النحاس عند درجة حرارة ($1110 - 1260 \text{ C}^\circ$) في إما محيط من الهيدروجين أو محيط مفرغ لمدة ساعة.

3-1-6-13 الترشيح بضغط الغاز (Gas Pressure Infiltration)

وهي طريقة تستخدم الترشيح بالقوة للطور السائل لتصنيع المواد المركبة التي أساسها المعادن، شكل (1-13)، باستخدام غاز مضغوط يتم تسليطه على المنصهر المعدني ويجبره على التغلغل بين الطور المنتشر المسبق التشكيل. تستخدم هذه التقنية في صناعة الأجزاء الكبيرة للمواد المركبة.

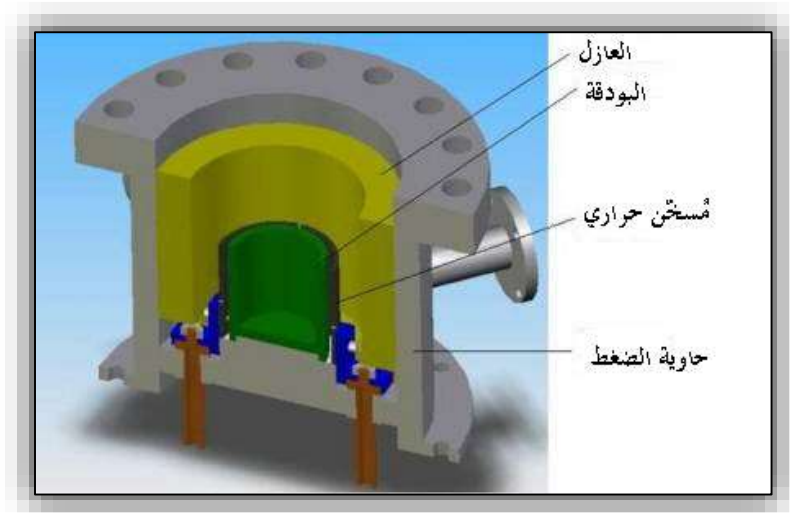


شكل (1-13) طريقة الترشيح بضغط الغاز لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

هذه الطريقة تسمح لنا باستخدام الألياف الغير مطلية وذلك بسبب قصر الفترة الزمنية التي يحدث فيها تماس بين هذه الألياف والمعدن الساخن. على النقيض من التقنيات التي تستخدم القوة الميكانيكية، فإن الترشيح بضغط الغاز سينتج عنها أقل تلف لألياف.

تتم التقنية هذه عادة على عدة مراحل: تفريغ ضغط الوعاء الإنضاطي (بعض المواد كالمغنيسيوم تسخن تحت حماية غازية لأن التبخير يمكن ان يحطم المعدات)، ثم التسخين تحت ضغط التفريغ حتى تنصهر المادة الأساس، تغميس المنتج المسامي المُشكّل مسبقاً في المنصهر، الترشيح تحت تأثير ضغط عالي ثم سحب المنتج من المنصهر (في حالة كون الترطيب غير كافي، يترك المنتج لكي يتجمد سوية مع المادة الأساس في البودقة). في بعض الحالات تنشأ روابط بين المكونات نتيجة الى التفاعل الكيميائي عند السطوح البينية (مثلاً تكوين الكرييدات)، لكن في بعض الأحيان تكون هذه الروابط ميكانيكية فقط.

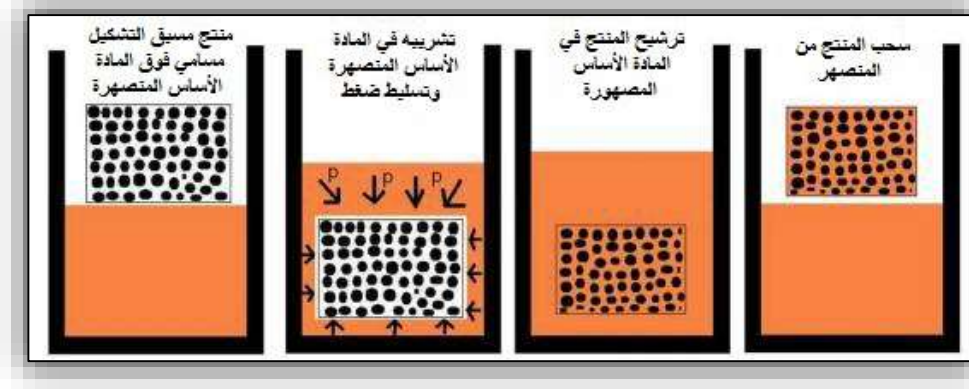
الشكل (2-13) يبين مقطع عرضي لمعدة الترشيح بمساعدة ضغط الغاز مبينة الحاوية الأنضغاطية، عزل عن الحاوية الأنضغاطية، مُسخن حراري وبودقة تستخدم لصهر المعدن.



الشكل (2-13) يبين مقطع عرضي لمعدة الترشيح بمساعدة ضغط الغاز.

خطوات طريقة الترشيح بالضغط، شكل (3-13) هي:

1. يوضع المنتج المسامي المُشكّل مسبقاً فوق المادة الأساس خلال عملية التسخين؛
2. غمس المنتج المسامي المُشكّل مسبقاً في المادة الأساس المنصهرة ونسلط غاز مضغوط عليها؛
3. ترشيح المنتج في المادة الأساس المنصهرة؛
4. سحب المنتج المرشح من المنصهر



شكل (13-3) خطوات طريقة الترشيح بضغط الغاز لصنع المواد المركبة المعدنية.

كما أشرنا سابقاً، هنالك مصطلح غالباً ما يشير الى تقنية الترشيح بالضغط وهو القابلية على الترطيب أو زاوية الترطيب (Wetting Angle). يتحدد الترطيب بزاوية التلامس بين الطور السائل والركيزة الصلبة. تستخدم هذه الطريقة لأنه في بعض الحالات تكون زاوية الترطيب بين المنصهر (المادة الأساس) والمادة الصلبة المسامية المقوية تكون نسبياً عالية. فلنتغلب على هذه المشكلة يجب علينا استخدام ضغط غازي عالي. فإذا كانت زاوية الترطيب (90°) أو أقل، فإن هذه الدرجة من الترطيب تعتبر جيدة. في بعض الأحيان، تكون زاوية الترطيب بين المكونات كبيرة جداً (النحاس النقي | ألياف الكربون) ولذلك سوف لا يكفي حتى الضغط العالي جداً ضمان نتائج الترشيح الجيد.

4-1-6-13 الترشيح بالسباكة بالعصر (Squeeze Casting Infiltration)

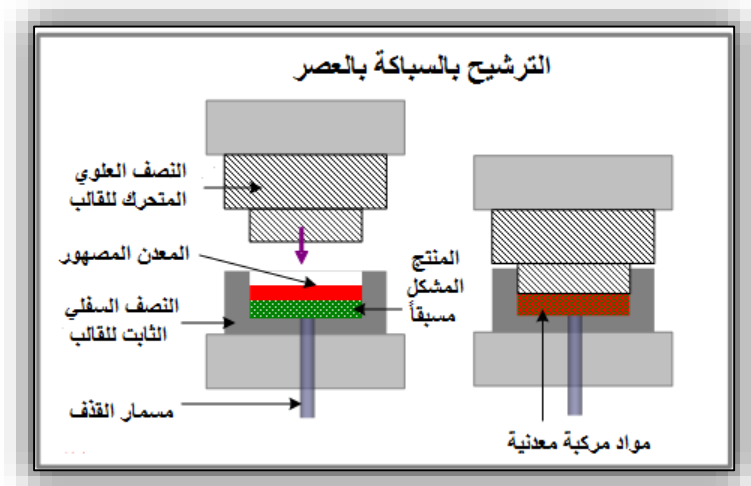
وهذه إحدى تقنيات الترشيح بالقوة في الطور السائل لتصنيع المواد المركبة التي أساسها المعادن، حيث يتم استخدام قالب متحرك (كباس) لتسليط الضغط على المنصهر المعدني، شكل (13-4).

وإجباره أن يتغلغل في داخل الطور المنتشر المسبق التشكيل، والموجود في القالب السفلي الثابت من القالب. إن هذه التقنية هي مشابهة التي تقنية لسباكة بالعصر والتي تستخدم في سباكة السبائك المعدنية.

وتتمثل خطوات عملية الترشيح بالسباكة بالعصر الخطوات التالية:

- 1- التشكيل المسبق للطور المنتشر (دقائق، ألياف) ويوضع في نصف القالب السفلي الثابت.
- 2- يتم سكب المعدن المنصهر بالكمية المناسبة على نصف القالب السفلي الثابت.

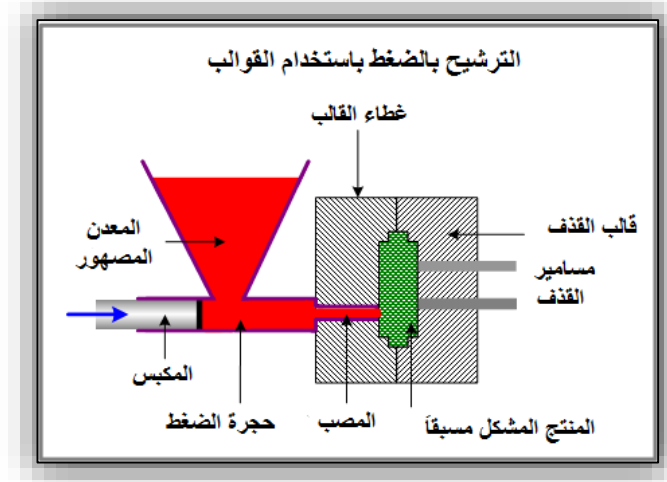
- 3- يتم تحريك نصف القالب العلوي المتحرك (الكباس) إلى الأسفل وسيعمل على ضغط السائل المعدني للترشيح خلال التشكيل المسبق للطور المنتشر.
- 4- سيتم تجمد المواد المرشحة تحت تأثير الضغط.
- 5- سيتم إخراج المنتج من القالب باستخدام مسامير القذف.
- تستخدم هذه التقنية في صناعة الأجزاء البسيطة والصغيرة (المكابس في محركات المركبات المصنوعة من سبائك الألمونيوم المقواة بألياف الألومينا القصيرة).



شكل (13-4) طريقة الترشيح بالسباكة بالعضر لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

5-1-6-13 الترشيح بقوالب الضغط (Pressure Die Infiltration)

وهذه هي تقنية أخرى يستخدم فيها الترشيح بالقوة بالطور السائل للمواد المركبة التي أساسها المعدن، شكل (13-5)، حيث يتم استخدام تقنية السباكة بالقوالب، عندما يتم وضع طور منتشر مسبق التشكيل (دقائق، ألياف) في قالب والذي يتم ملئه بالمعدن المصهور ويدخل إلى القالب عن طريق مصب ويتغلغل داخل الطور المنتشر مسبق التشكيل تحت تأثير ضغط المكبس المتحرك.



شكل (13-5) طريقة الترشيح بالضغط باستخدام القوالب لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

2-6-13 طريقة الحالة الصلبة (Solid state fabrication Method)

هذه الطريقة التي يتم فيها تشكيل المادة الأساس المعدنية كنتيجة للترابط الحاصل بين المعدن (الطور الأساس) والطور المنتشر نتيجة للانتشار التبادلي الحادث بينهما في الحالة الصلبة عند درجات الحرارة العالية تحت تأثير الضغط. انخفاض الحرارة في طريقة الحالة الصلبة بالمقارنة مع طريقة الحالة السائلة ستخفض من احتمالية حدوث التفاعلات غير المرغوب فيها عند الحدود ما بين الطور الأساسي والطور المنتشر (المقوي).

يمكن كذلك تشكيل المواد المركبة بعد عملية التليد بالدفلة، بالحرارة، بالكبس، بالسحب، أو الثقب. عملية التشكيل يمكن إجراؤها إما على البارد (تحت درجة حرارة إعادة التبلور) أو على الساخن (فوق درجة إعادة التبلور).

التشكيل للمواد المركبة الملبدة والمقواة بطور منتشر على شكل ألياف قصيرة سينتج عنها توجيه الألياف وتباين خواص المواد المركبة (تعزيز الصلابة على طول الألياف الموجهة). هنالك طريقتان أساسيتان لتصنيع المواد المركبة بالحالة الصلبة وهما:

(1) الترابط بالانتشار (Diffusion Bonding)

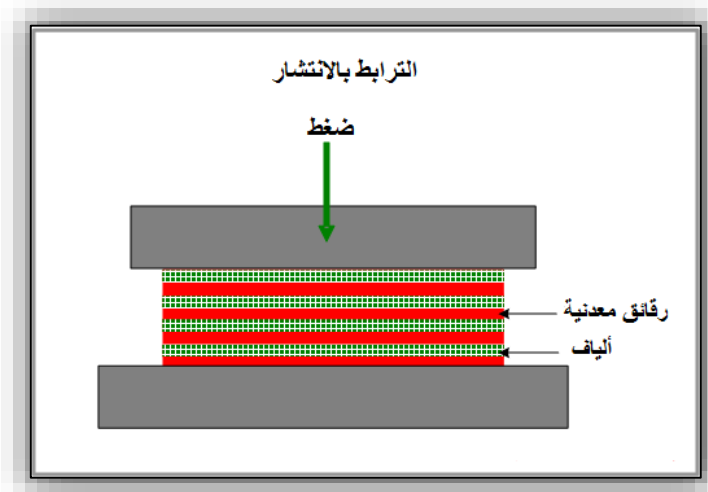
(2) التليد (Sintering)

1-2-6-13 الترابط بالانتشار (Diffusion Bonding)

وهي إحدى طرائق التشكيل بالحالة الصلبة والتي تستخدم كإحدى تقنيات تشكيل المواد المركبة التي أساسها المعدن، حيث في هذه الطريقة يكون الطور الأساسي بشكل رقائق (Foil) معدنية والطور بشكل ألياف طويلة يتم تكديسها بطريقة معينة ثم يتم كبسها عند درجة حرارة

عالية.المادة المركبة الطبقة النهائية ستمتلك بنية هيكلية عديدة الطبقات (Multi layer structure) كما مبين في الشكل (6-13).

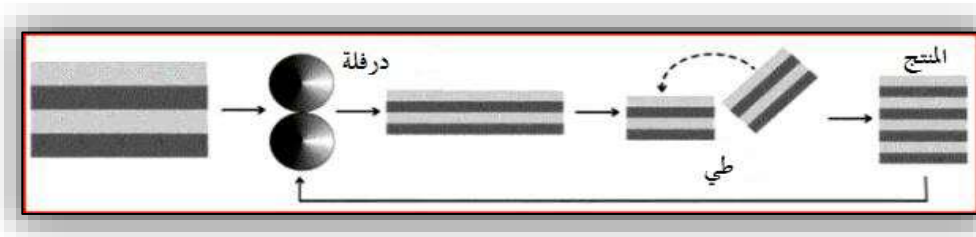
تستخدم تقنية الترابط بالانتشار في تصنيع الأشكال البسيطة (الصفائح، الأنابيب). هنالك طرائق مختلفة للترابط بالانتشار وهي الترابط وهي الترابط بالدرفلة وطريقة اللف الخيطي/ الليفي.



شكل (6-13) طريقة الترابط بالانتشار لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

أ) طريقة الترابط بالدرفلة (Roll Bonding)

وهي طريقة درفلة على الساخن أو البارد يتم فيها تركيب شريطان من معدنين مختلفين (مثلاً صلب كربوني وسبيكة ألومنيوم) وسينتج عن تشكيلهما سويةً بالدرفلة مادة مركبة طبقية مع وجود روابط ميتالورجية (معدنية) بين الطبقتين، شكل (7-12).



شكل (7-13) طريقة الترابط بالدرفلة لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

ب) طريقة اللف الخيطي/ الليفي (Wire/ fiber winding)

وهي طريقة يتم خلالها تركيب ولف ألياف سيراميكية مستمرة مع ألياف معدنية يتبعها عملية كبس عند درجات حرارة عالية.

2-2-6-13 التلييد Sintering

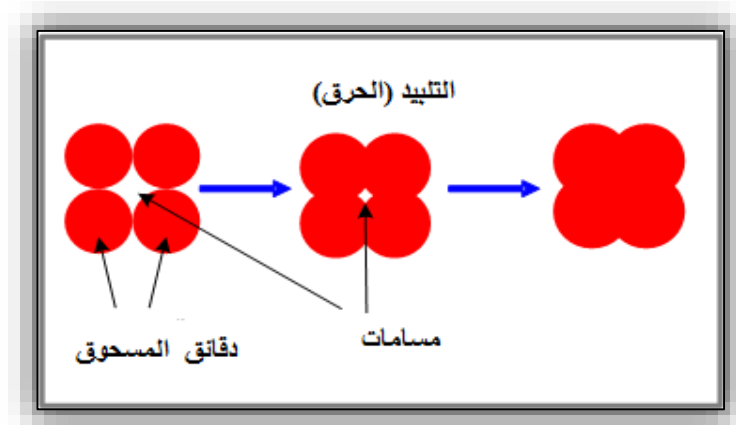
ان الطور هنا سيكون في شكل دقائق أو ألياف قصيرة يتم كبسه بمراحل ويلبد في الحالة الصلبة (بعض الأحيان مع وجود سائل).

التلييد هي طريقة تشمل اندماج حبيبات المسحوق (المكبوس الأخضر) بالتسخين إلى درجات حرارية عالية لكنها أقل من درجة حرارة الانصهار، حيث يحدث الانتشار للرقائق المنفصلة إلى دقائق المسحوق المجاورة لها، شكل (8-13).

على النقيض من تقنية الطور السائل لتصنيع المواد المركبة التي أساسها المعدن، فإن طريقة التلييد ستسمح بالحصول على محتوى حجمه قد يصل إلى 50% للطور المنتشر.

عندما يتم الجمع بين عمليتي التلييد والتشكيل، فإن الطريقة يمكن أن تسمى:

- 1- طريقة الكبس الساخن لتصنيع المواد المركبة التي أساسها المعدن.
- 2- طريقة الكبس الأيزوستاتيكي الساخن (المتساوي من جميع الاتجاهات) لتصنيع المواد المركبة التي أساسها المعدن.
- 3- طريقة البثق المسحوق الساخن لتصنيع المواد المركبة التي أساسها المعدن.

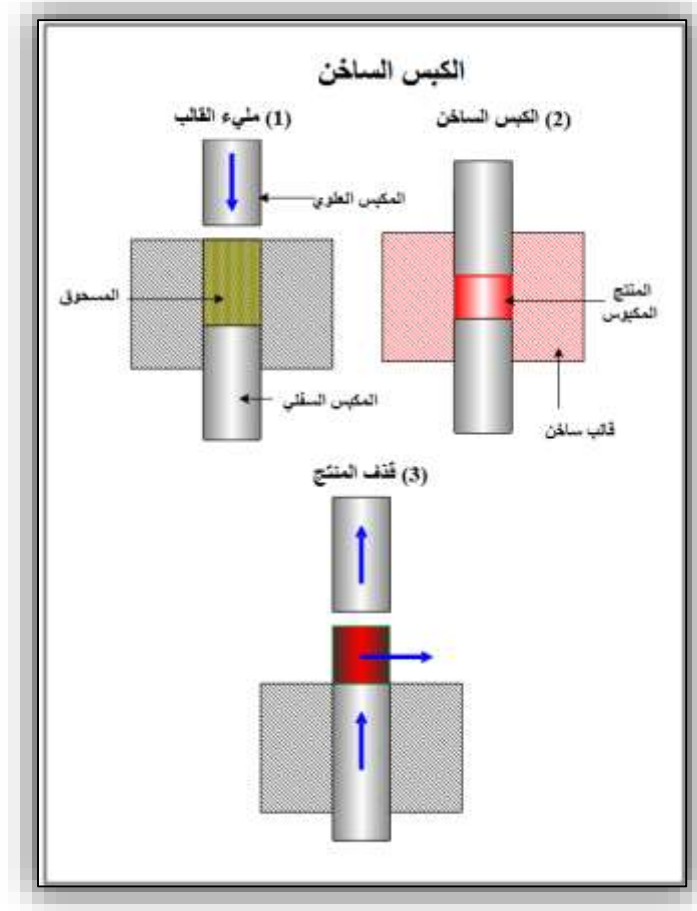


شكل (8-13) التلييد.

7-13 طريقة الكبس الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية.**Hot pressing fabrication of metal matrix composites.**

هذه الطريقة هي عبارة عن عملية تلييد تحت تأثير ضغط مسلط باتجاه واحد يتم تسليطه

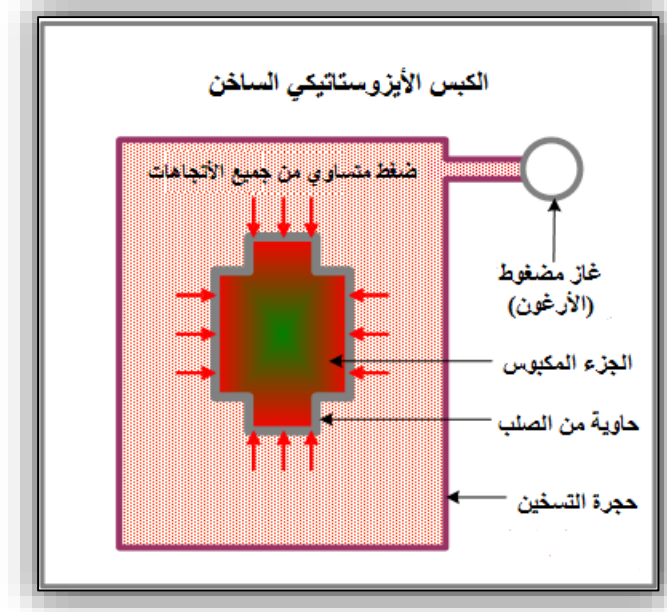
بمكبس ساخن، شكل (9-13).



شكل (9-13) طريقة الكبس الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

1-7-13 طريقة الكبس الأيزوستاتيكي الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية. Hot isostatic pressing fabrication of metal matrix composites.

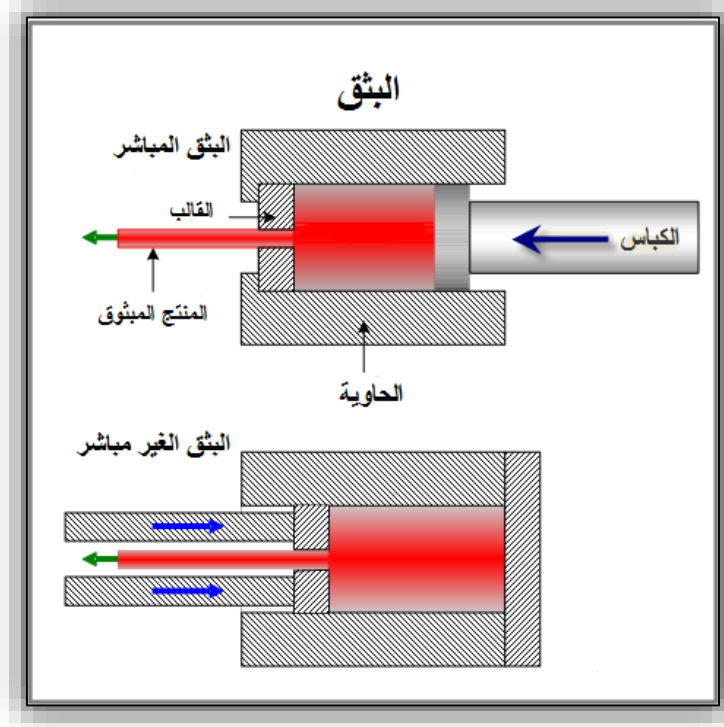
في هذه الطريقة يتم التلبيد تحت تأثير ضغط مساعدة نقاط تسليط باستخدام وسط سائل أو غازي يحيط بالجزء المكبوس عند درجة حرارة عالية، شكل (10-13).



شكل(10-13) طريقة الكيس الأيزوستاتيكي الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

2-7-13 طريقة بثقب المسحوق الساخن لتصنيع المواد المركبة المعدنية Hot powder Extrusion fabrication of metal matrix composites.

وهي طريقة يتم من خلالها التلبيد تحت تأثير الضغط المسلط بواسطة باثق عند درجات حرارية عالية، شكل (11-13).



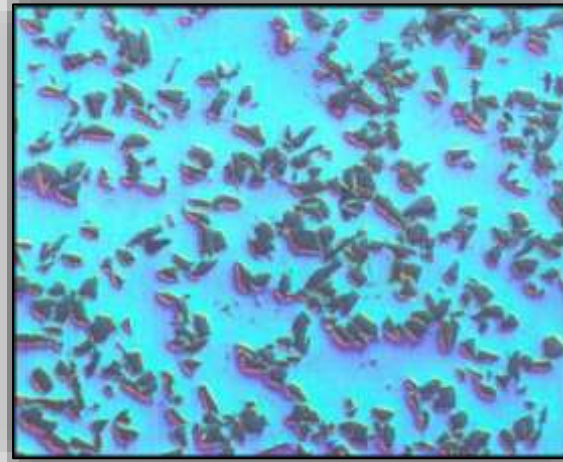
شكل(11-13) طريقة البثق لتصنيع المواد المركبة المعدنية.

3-7-13 طريقة التصنيع في الموقع الأصلي لتصنيع المواد المركبة المعدنية In-situ fabrication of metal matrix composites.

في هذه الطريقة يتم تكوين الطور المنتشر (المقوي) في المادة الأساس كنتيجة للترسيب من المعدن المنصهر خلال عملية التبريد أو التجميد. هنالك العديد من المواد المركبة التي أساسها المعدن التي يمكن أن تصنع بهذه الطريقة ومنها:

1- الدقائقية في طريقة الموقع الأصلي لتقوية المواد المركبة التي أساسها المعدن (Particulate In-Situ MMC).

حيث يتم بهذه الطريقة تخليق الطور المنتشر بشكل دقائق (يجب أن تكون نسبتها الحجمية أكبر من 5% وإلا اعتبرت متضمنات Inclusions) من الأمثلة: تقوية الألمنيوم بدقائق بوريد التيتانيوم (TiB_2)، وتقوية المغنيسيوم بدقائق (Mg_2Si) سليكات المغنيسيوم، شكل (12-13).



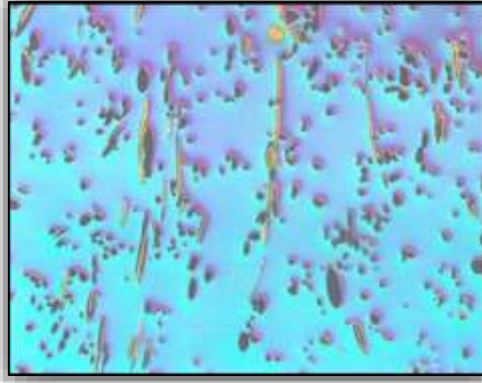
شكل (12-13) بنية مجهرية لمادة مركبة معدنية مقواة بالدقائق.

2- الألياف القصيرة المقواة في طريقة الموقع الأصلي لتصنيع المواد المركبة التي أساسها المعدن.

(Short-Fiber Reinforced in Situ MMC)

وفي هذه الطريقة يتم استخدام ألياف قصيرة لتقوية المادة المركبة بواسطة طريقة الموقع الأصلي بتخليق الطور المنتشر بشكل ألياف قصيرة أو شعيرات (Whiskers) (بلورة وحيدة تنمو بشكل ألياف قصيرة).

من الأمثلة: تقوية التيتانيوم بشعيرات بوريد التيتانيوم (TiB_2)، تقوية الألمنيوم بشعيرات ألومينات التيتانيوم ($TiAl_3$)، شكل (13-13).



شكل(13-13) بنية مجهرية لمادة مركبة مقواة بالألياف القصيرة.

3- الألياف الطويلة المقواة في طريقة الموقع الأصلي لتصنيع المواد المركبة التي أساسها

المعدن Long-fiber reinforced in situ MMC

حيث تستخدم هذه الطريقة الألياف الطويلة المختلفة عن طريق استخدام طريقة الموقع

الأصلي والتي تكون بشكل ألياف مستمرة.

من الأمثلة: المادة الأساس نيكيل - ألمونيوم المقواة بالألياف الطويلة، شكل(13-14).



شكل(14-13) بنية مجهرية لمادة مركبة مقواة بالألياف المستمرة (الطويلة).

1-3-7-13 فوائد طريقة الموقع الاصلي للمواد المركبة المعدنية

1- في هذه الطريقة تكون الدقائق والألياف أصغر بالمقارنة مع التقنيات التي تستخدم

أطواراً منتشرة منفصلة؛

2- يكون الطور المنتشر أكثر تجانساً في التوزيع؛

3- الترابط بين الطور المنتشر والمادة الأساس أفضل من الطرائق الأخرى؛

4- المعدات والتقنيات المستخدمة هنا تكون أقل كلفةً.

2-3-7-13 عيوب طريقة الموقع الأصلي

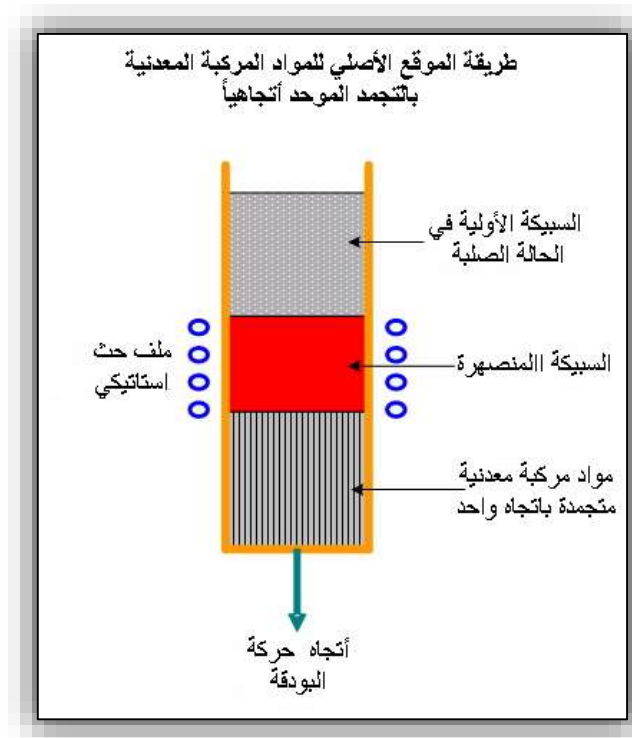
- 1- يكون اختيار الطور المنتشر محدداً بقابليته لديناميكية الحرارية لترسب في المادة الأساس المحددة.
- 2- ظروف التجمد ستتحكم بحجم الدقائق كطور منتشر.

8-13 التجمد الموحد للاتجاه للسبائك اليوتكتيكية**(Unidirectional Solidification of an Eutectic Alloy)**

السبائك ذات التركيب اليوتكتيكي ربما ينتج عنها تكوين بنية هيكلية يوتكتيكية، والتي فيها واحد من المكونات يكون بشكل خيوط مستمرة وطويلة.

رسم تخطيطي لجهاز التجمد الموحد للاتجاه بطريقة الموقع الأصلي للمواد الأساس المعدنية، مبين في الشكل (13-15).

حيث تتحرك بودقة تحتوي على سبيكة يوتكتيكية إلى الأسفل (أو كطريقة بديلة يتحرك ملف الحث إلى الأعلى). هذه الحركة سينتج عنها عملية إعادة صهر تتبعها عملية إعادة تجمد للسبيكة تحت ظروف تبريد متحكماً فيها.



شكل (13-15) طريقة التجمد الموحد للاتجاه باستخدام طريقة الموقع الأصلي للمواد المركبة المعدنية.

مقدار الحرارة المنتقلة من خلال قعر البودقة بالإضافة الى سرعة البودقة (v) والقدرة المجهزة من ملفات التسخين (ملفات الحث) سيحددون الانحراف في درجة الحرارة، والذي سيزودنا بالتجمد الموحد الاتجاه مع تجمد مسطح في المقدمة.

تتطلب السبائك بنية يوتكتيكية موجهة على طول اتجاه التجميد مع مكونات يوتكتيكية بشكل بلورات-وحيدة وطويلة (ألياف). المسافة بين الألياف (d) يتم تحديدها بسرعة التجميد (v) بموجب المعادلة التالية:

$$d^2 \sim V$$

أسئلة الفصل

- 1) ما هي المميزات التي تتفوق فيها المواد المركبة المعدنية على المواد المركبة اللدائية؟
- 2) ما هي الخطوات التي غالباً ما تتضمنها عمليات تصنيع المواد المركبة المعدنية؟
- 3) كيف يتم تقوية الألمنيوم كمادة أساس عند استخدامها في المواد المركبة؟
- 4) ما هي أهم خواص المواد المركبة المعدنية التي أساسها الألمنيوم؟ وأين تستخدم هذه المواد في التطبيقات الهندسية؟
- 5) اذكر أهم خواص المواد المركبة المعدنية التي أساسها المغنيسيوم؟ وما هي أهم تطبيقاتها؟
- 6) كيف تتم تقوية المواد المركبة المعدنية التي أساسها التيتانيوم؟
- 7) اذكر أهم خواص المواد المركبة المعدنية التي أساسها التيتانيوم؟
- 8) كيف تتم تقوية المواد المركبة المعدنية التي أساسها النحاس؟
- 9) اذكر أهم خواص المواد المركبة المعدنية التي أساسها النحاس؟
- 10) ما هي طريقة الحالة السائلة المستخدمة في تصنيع المواد المركبة المعدنية؟
- 11) أذكر أهم ما تتميز به طريقة السباكة بالخط؟
- 12) تعتبر طريقة الترشيح إحدى طرائق تصنيع المواد المركبة المعدنية، وضح هذه الطريقة؟ وما هي الخطوات الرئيسية فيها؟
- 13) وضح عمليات تصنيع المواد المركبة المعدنية التالية:
 - أ- طريقة الترشيح بضغط الغاز
 - ب- الترشيح بالسباكة بالعصر
 - ج- الترشيح بقوالب الضغط
- 14) ما هي طريقة الحالة الصلبة لتصنيع المواد المركبة المعدنية؟
- 15) وضح طرائق تصنيع المواد المركبة المعدنية التالية معززاً أجابتك بالرسوم التوضيحية:
 - أ- الترابط بالانتشار
 - ب- اللف الخيطي
 - ج- التليد
 - د- الكبس الساخن

هـ - الكبس الأيزوستاتيكي

و - بثق المسحوق الساخن

ز - طريقة الموقع الأصلي

16) ما هي عيوب طريقة الموقع الأصلي؟

الفصل الرابع عشر: المواد المركبة اللدائنية (التي أساسها اللدائن) Polymer Matrix Composites

14-1 مقدمة

بالرجوع إلى تصنيف المواد المركبة فإن هذه المواد ستتألف من اللدائن (الراتنجات) كمادة أساس مع الطور المنتشر للتقوية الذي يكون عادةً أليافاً. تعتبر المواد المركبة التي أساسها اللدائن من المواد المستعملة بكثرة وفي مجالات متعددة وذلك يعود إلى كلفتها المنخفضة وخصائصها عند درجة الحرارة الاعتيادية وطرائق تشكيلها البسيطة.

إن استخدام اللدائن غير المقواة كمواد هيكلية يكون محدود نتيجة لانخفاض الخواص الميكانيكية لهذه المواد، فصلاية الشد لأكثر اللدائن صلابة هو راتنج الأيبوكسي (140 MPa). بالإضافة إلى الصلاية المنخفضة، فغن اللدائن تمتلك مقاومة ضعيفة للصدمات. إن تقوية اللدائن باستخدام شبكة ليفية ستمكننا من صناعة مواد مركبة أساسها اللدائن تتميز بالخواص التالية:

- الصلاية العالية في تحمل قوى الشد.
- الصلابة العالية.
- مقاومة الكسر العالية.
- مقاومة البلى العالية.
- مقاوم جيد ضد الاختراق (الثقب).
- مقاومة عالية للتآكل.
- التكلفة المنخفضة.

إن أهم العيوب لهذا النوع من المواد الأساس التي تستخدم في صناعة المواد المركبة هي:

- المقاومة الحرارية المنخفضة.
- معامل التمدد الحراري العالي.

هنالك نوعان من أنواع اللدائن اللتين يستخدمان في صناعة المواد المركبة هما: الترموستيك (Thermosets) (اللدائن التي تتصلب بالتسخين) (كالأيبوكسيديات والفينولات). والترموبلاستيك

(اللدائن الحرارية) (Thermoplastics) (البولي إثيلين المنخفض الكثافة LDPE، البولي إثيلين عالي الكثافة (HDPE)، البولي بروبيلين، النايلون والأكريليك). بموجب المادة المقوية فإن مجاميع المواد الأساسية اللدائنية المستخدمة في صناعة المواد المركبة هي:

- ❖ المواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الزجاجية.
- ❖ المواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الكربونية.
- ❖ المواد المركبة اللدائنية المقواة بألياف كيفلير.
- ❖ إن التقوية بالألياف يمكن أن يترتب بأشكال مختلفة:
- ❖ الألياف الموحدة الاتجاه.
- ❖ الألياف الطائفة (Rovings).
- ❖ حصيرة رقيقة: تكديس بطبقة رقيقة من الألياف باتجاهات عشوائية.
- ❖ جديلة متقطعة: تكديس بطبقة رقيقة من الألياف العشوائية الاتجاه والملتفة قليلاً (3-4) بوصة.
- ❖ بنية نسيجية.

وتتحدد خواص المواد المركبة التي أساسها اللدائن بالعوامل التالية:

- 1- خواص الألياف.
- 2- اتجاه الألياف.
- 3- تركيز الألياف.
- 4- خواص المادة الأساس.

يمكن تخمين خواص المواد المركبة التي أساسها اللدائن بقانون الخلط.

تستخدم المواد المركبة التي أساسها اللدائن في صناعة بنية المركبات الفضائية، أبدان الزوارق، أجزاء المركبات، التجهيزات الرياضية (الغولف، التزلج، مضارب كرة التنس، عصي الصيد)، الدروع المضادة للرصاص والدروع الأخرى، المكابح وبطانة القوابض الاحتكاكية (Clutch lining).

14-2 المواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الزجاجية

إن الألياف الزجاجية، شكل (1-14)، هي الاسم الشائع لتقوية المواد المركبة التي أساسها اللدائن وذلك باستخدام ألياف زجاجية دقيقة. حيث يكون الطور المنتشر المقوي إما ألياف زجاجية مستمرة (طويلة) أو قصيرة.



شكل (1-14) الألياف الزجاجية.

يستخدم الزجاج كمادة في صناعة الألياف نظراً للخواص التالية التي يمتلكها:

- 1- مادة متوفرة بسهولة وكلفتها منخفضة الثمن.
- 2- يمكن الحصول على الألياف الطويلة المصنوعة من هذه المادة بتقنيات بسيطة وقليلة التكلفة من الزجاج المنصهر.
- 3- صلابة الشد العالية والتي قد تصل لغاية (400 MPa) عندما يغمر في المادة الأساس (اللدائن) فانه سينتج مواداً مركبة ذات صلابة نوعية عالية جداً.
- 4- مقاومة التآكل العالية.
- 5- عندما يخلط مع اللدائن سيمتلك خمولية كيميائية مما يجعله المادة المركبة المفيدة في الاستخدام في البيئة الأكالة.

أما أنواع الزجاج المستخدم في صناعة الألياف الزجاجية فهي:

- 1- الزجاج (E): وهو الأكثر استخداماً والأقل تكلفة في الألياف الزجاجية. الرمز (E) يشير إلى (Electrical) حيث أن الزجاج (E) فهو SiO_2 52-56%، Al_2O_3 12-16%، CaO 16-25%، B_2O_3 13-18%.
- 2- الزجاج (S): وهو أكثر صلابة من النوع (E) والحرف (S) في التطبيقات العسكرية وفي مجالات الفضاء. يتألف الزجاج نوع (S) من السليكا (SiO_2) والمغنيسيا (MgO) والألومنيا (Al_2O_3).

3- الزجاج (S+R): وهو الأكثر صلابة والأكثر كلفة في أنواع الألياف الزجاجية ويمتلك الأقل قطراً (نصف قطر الألياف الزجاجية نوع E).

4- الزجاج (C): وتصنع منه الألياف الزجاجية المقاومة للمواد الكيميائية والتآكل (Corrosion). يستخدم هذا النوع من الألياف في صناعة الخزانات، الأنابيب، والمعدات المقاومة للكيمائيات.

تصنع الألياف الزجاجية من الزجاج المصهور، والذي عن طريقه يتم سحب الخيوط الأحادية للزجاج ومن ثم جمعهم كجداول (Strands). تستخدم الجداول في تحضير منتجات الألياف الزجاجية المختلفة (المغزول، المنسوج، الحصائر).

إن المادة الأكثر استخداماً كمادة أساس مع الألياف الزجاجية هي اللدائن من نوع الثرموستيك (اللدائن التي تتصلب بالتسخين)، مثل البولي إستر غير المشبع Unsaturated polyesters، الأبيوكسيدات (EP)، واللدائن من نوع الثرموبلاستيك (اللدائن الحرارية) كالنايلون (البولي أميد)، البولي كربونيت (PC) البولي سيترين (PS) والبولي فينيل كلورايد (PVC).

غالباً ما تمتلك مواد الألياف الزجاجية بنية طبقية باتجاهات مختلفة للألياف لكل طبقة. الاتجاهات المختلفة للألياف الزجاجية سينتج عنه التماثل في خواص المادة في جميع الاتجاهات الموازية للطبقات. إن تركيز الألياف الزجاجية في هذا النوع من المواد المركبة في الغالب يكون ما بين 40 - 70 %.

المواد المركبة التي أساسها اللدائن والمقواة بالألياف الزجاجية يتم تصنيعها بطريقة القالب المفتوح، والقالب المغلق والتغميس (Pultrusion).

إن أهم الخواص التي تتميز بها هذا النوع من المواد المركبة هي ما يلي:

- 1- النسبة العالية ما بين الصلابة إلى الوزن.
- 2- النسبة العالية ما بين معامل المرونة إلى الوزن.
- 3- المقاومة الجيدة ضد التآكل.
- 4- المقاومة الحرارية المنخفضة (بالمقارنة مع المعادن والسيراميك).

تستخدم مواد الألياف الزجاجية في تصنيع أغلفة منظومات الرادار، المسابح، السقوف، الأنابيب. إن هذه المواد هي ببساطة عبارة عن مواد مركبة تحتوي على الألياف الزجاجية والتي تكون إما مستمرة (طويلة) أو غير مستمرة (قصيرة)، يتم احتوائها ضمن الطور الأساس الذي يكون من اللدائن؛ إن هذا النوع من المواد المركبة ينتج بكميات كبيرة. إن الزجاج كطور منتشر سيكون في الغالب كألياف مسحوبة (يشار إليها كزجاج - E) ؛ وقطر هذه الألياف عادةً ما يتراوح ما بين (3- 20 μm). أن استخدام الزجاج كأليافاً للتقوية يعود إلى الأسباب التي أشرنا إليها سابقاً.

ان الخصائص السطحية للألياف الزجاجية مهمة جداً لأن وجود العيوب السطحية الدقيقة يمكن أن تحدث ضرراً في خواص الشد، كما ناقشنا ذلك سابقاً. أن الفجوات السطحية يمكن ان تحدث بسهولة بالاحتكاك أو الفرك لهذه السطوح مع مواد صلبة أخرى. كذلك فان السطوح الزجاجية التي تتعرض الى الجو المحيط حتى ولو لفترة قصيرة ستمتلك عموماً طبقات سطحية أضعف بالمقارنة مع التي تكون في الداخل والتي تكون محاطة ومرتبطة بالطور الأساس. فعندما يتم تصنيع الألياف الزجاجية بالسحب حديثاً، فإنها عادة ما تظلى خلال عملية السحب هذه بطبقة رقيقة من مادة لحماية سطوح هذه الألياف من التحطم أو حدوث تفاعلات بيئية غير مرغوب فيها. ان هذه الطبقة من الطلاء ستزال طبعاً عند استخدام الألياف في تصنيع المواد المركبة وتستبدل بعامل مقرن (Coupling Agent) أو إنهاء ذلك، للسماح بالحصول على روابط أفضل بين الألياف والطور الأساس.

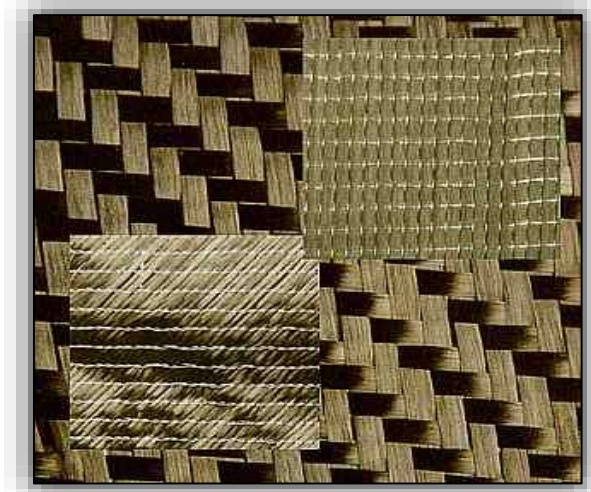
هنالك العديد من المحددات لهذه المجموعة من المواد المركبة، فعلى الرغم من امتلاكها الصلابة العالية إلا إنها ليست جاسئة جداً ولا تُظهر الجساءة الضرورية لبعض التطبيقات (مثلاً: كأجزاء إنشائية للطائرات والجسور). أن أغلب مواد الألياف الزجاجية تكون محدودة الاستخدامات عند درجات الحرارة التي ما دون (200 °C) ؛ فعند درجات الحرارة التي أعلى من ذلك، أغلب اللدائن ستبدأ بالتلين أو ستتضرر. يمكن زيادة استخداماتها عند درجات الحرارة لغاية (300 °C) عن طريق استخدام السليكا المصهورة ذات النقاوة العالية في صناعة الألياف وكذلك باستخدام لدائن تتحمل درجات حرارية عالية كراتنج البولي إيميد (Polyimide Resins).

3-14 المواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الكربونية

Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites

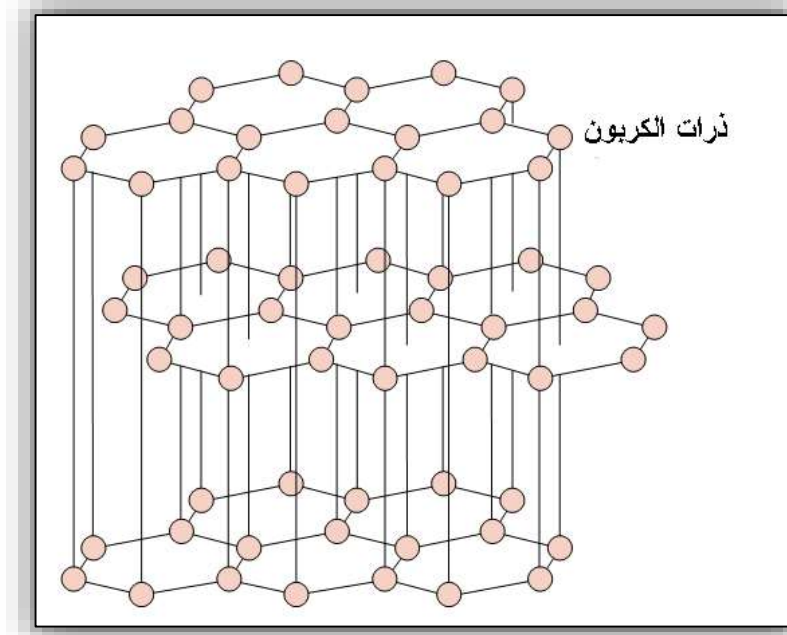
ان الكربون هو مادة لصنع ألياف ذات أداء عالي الجودة وهي المادة الأكثر استخداماً في تقنيات التقوية الحديثة والمتطورة لإنتاج المواد المركبة اللدائنية.

في هذا النوع من المواد المركبة يكون الطور المنتشر المُقوي هو ألياف الكربون ويكون إما بأطوال مسطحة (طويلة) أو قصيرة وبقطر ما بين (4 - 10 μm) وبشكل نسيج كالقماش. شكل (2-14).



شكل (2-14) مجموعة مختلفة لمنسوجات من ألياف الكربون.

- تعتبر الألياف الكربونية من الألياف الباهظة الثمن إلا أنها تمتلك أعلى الخواص الميكانيكية النوعية (مقسومة على الوزن): (معامل المرونة والصلابة).
- تستخدم الألياف الكربونية في تقوية المواد المركبة التي أساسها اللدائن نتيجة للأسباب التالية:
- 1- معامل مرونة نوعي عالي جداً يتجاوز معاملات جميع المواد المستخدمة للتقوية.
 - 2- صلابة الشد العالية، والتي ربما تقترب من (7 GPa).
 - 3- الكثافة المنخفضة (1800 kg/m^2).
 - 4- الخمولية الكيميائية العالية.
 - 5- هذه المواد تحافظ على معامل مرونتها وصلابتها العاليتين حتى عند درجات الحرارة العالية.
 - 6- لقد تم تطوير عمليات تصنيع هذه الألياف بحيث أصبحت نسبياً غير مكلفة.
 - 7- عند درجة حرارة الغرفة، لا تتأثر ألياف الكربون بالرطوبة أو بمجموعة كبيرة من المذيبات والحوامض والقواعد.
 - 8- تظهر هذه الألياف أنواعاً من الخصائص الفيزيائية والميكانيكية تسمح للمادة المركبة بالتعامل مع هذه الألياف التي تمتلك خواص هندسية نوعية.
- ان ألياف الكربون هي ليست بلورية بالكامل، لكنها تتألف من كل من الجرافيت والمناطق الغير بلورية؛ حيث ان هذه المساحات الغير بلورية ستكون خالية من التنظيم الثلاثي الأبعاد لشبكة الكربون السداسية التي هي إحدى خصائص الجرافيت، شكل (3-14)



شكل (14-3) البنية البلورية للجرافيت.

ان أهم عيوب ألياف الكربون (الجرافيت) هي نمط الانهيار في الفشل (ألياف الكربون تكون قصفيه).

إما أهم أنواع الألياف الكربونية (شكل 14-4) فهي:

- ❖ النوع ذو معامل المرونة الفائق (Ultra High Modulus) (UHM) ؛معامل المرونة $(450 \text{ GPa}) <$
- ❖ النوع ذو معامل المرونة العالي (High Modulus) (HM) ؛ معامل المرونة في المدى $(450 \text{ GPa} - 350)$.
- ❖ النوع ذو معامل المرونة المتوسط (Intermediate Modulus) (IM) ؛معامل المرونة في المدى $(350 - 200) \text{ GPa}$
- ❖ النوع ذو مقاومة الشد العالية ومعامل المرونة المنخفض (High Tensile, Low Modulus) (HT) ، صلابة الشد $< 3 \text{ GPa}$ ، معامل المرونة $> 100 \text{ GPa}$.
- ❖ النوع ذو مقاومة الشد السوبر (المحسنة) (Super High Tensile) (SHT) صلابة الشد $< 4.5 \text{ GPa}$



شكل (14-4) مجموعة من الألياف الكربونية.

كذلك تصنف الألياف الكربونية بموجب طريقة التصنيع الى:

1-3-14 الألياف الكربونية المصنعة من البولي أكريلونايترايل

PAN – Based Carbon Fibre

في هذا النوع من الألياف الكربونية يتم إنتاجها من تحويل مادة البولي أكريلونايترايل (PAN) خلال المراحل التالية:

- 1- مط الخيوط من مادة البولي أكريلونايترايل والتي تأكسدها الحراري عند درجة (200 °C) وتمسك الخيوط في حالة الشد.
- 2- عمل الكربنة تحت جو من النيتروجين عند درجة حرارية (1200 °C) لساعات عديدة. خلال هذه المرحلة فإن العناصر غير المكرينة (H,N,O) ستتبخز وينتج عن ذلك ألياف غنية بالكربون.
- 3- الجرفطة عند درجة حرارة (2500 °C).

2-3-14 الألياف الكربونية المصنعة من القطران

Pitch-Based Carbon Fiber

يصنع هذا النوع من الألياف من القطران وذلك بحسب الخطوات التالية:

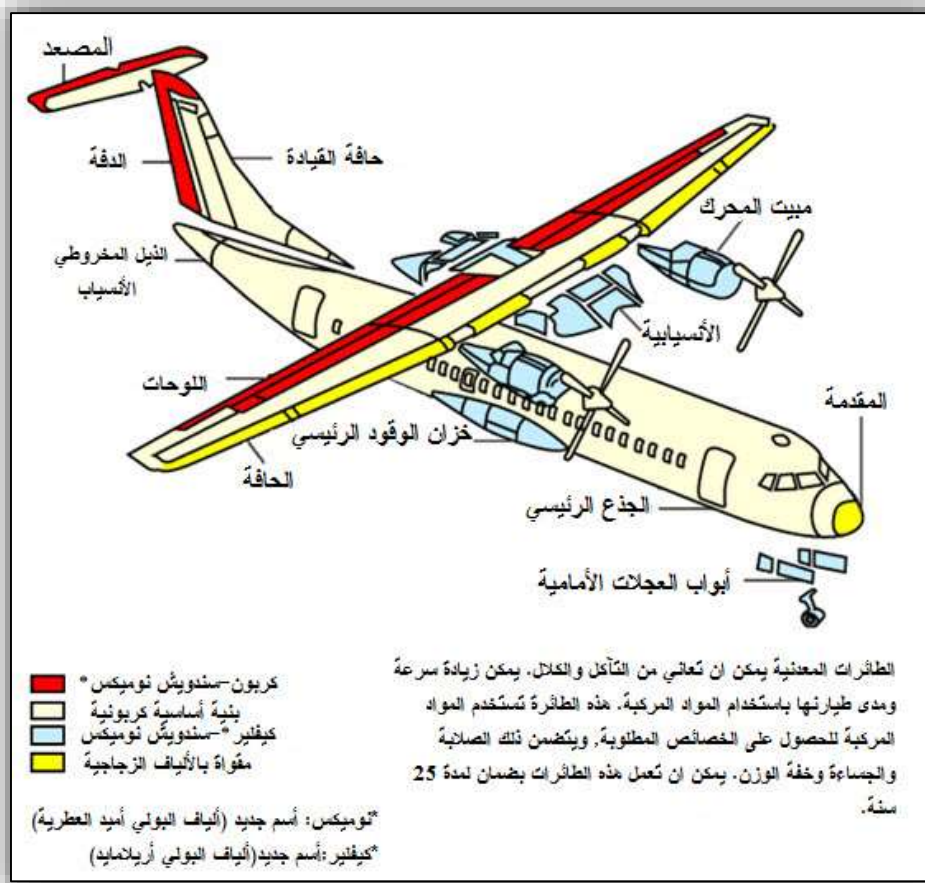
- 1- غزل الخيوط من قطران الفحم أو الأسفلت النفطي (القطران).
- 2- يتم إنضاج الألياف عند درجة حرارة (315 °C).
- 3- الكربنة في جو من غاز النيتروجين عند درجة حرارة (1200 °C).

المادة الأساس الأكثر استخداماً في المواد المركبة التي أساسها اللدائن والمقواة بالألياف الكربونية هما الثرموستيك (الأيوكسي والبولي يستر) والثرمو بلاستيك (كالبولي أميد). يمتلك هذا النوع من المواد المركبة عادةً البنية الطبقيّة مزودة التقوية في اتجاهين متعامدين في الاتجاه.

يصنع هذا النوع من المواد المركبة بطرائق القالب المفتوح والقالب المغلق والتغميس. إن أهم ما تتميز به المواد المقواة بالألياف الكربونية هي:

- 1- خفة الوزن.
- 2- النسبة العالية للصلابة إلى الوزن.
- 3- النسبة العالية جداً لمعامل المرونة إلى الوزن.
- 4- صلابة الكلال العالية.
- 5- المقاومة العالية ضد التآكل.
- 6- معامل التمدد الحراري المنخفض جداً.
- 7- المقاومة المنخفضة ضد الصدمات.
- 8- الموصلية الكهربائية العالية.
- 9- الكلفة العالية.

إن أهم التطبيقات لهذا النوع من المواد المركبة هو في مجال (المركبات البحرية وأجزاء المركبات الفضائية شكل (14-5)، المنتجات الرياضية كالجولف ومضارب التنس وأعمدة الصيد) وأبدان الدراجات، الأواني الانضغاطية، المكونات الانشائية للطائرات-كلا النوعين العسكري والتجاري، الأجنحة الثابتة والطائرات المروحية (مثل الجناح، البدن، المثبتات، وأجزاء الدفة).



شكل(14-5) بعض التطبيقات لهذا النوع من المواد المركبة.

14-4 المواد المركبة اللدائنية المقواة بألياف الأراميد

Aramid Fibre-Reinforced Polymer Composites

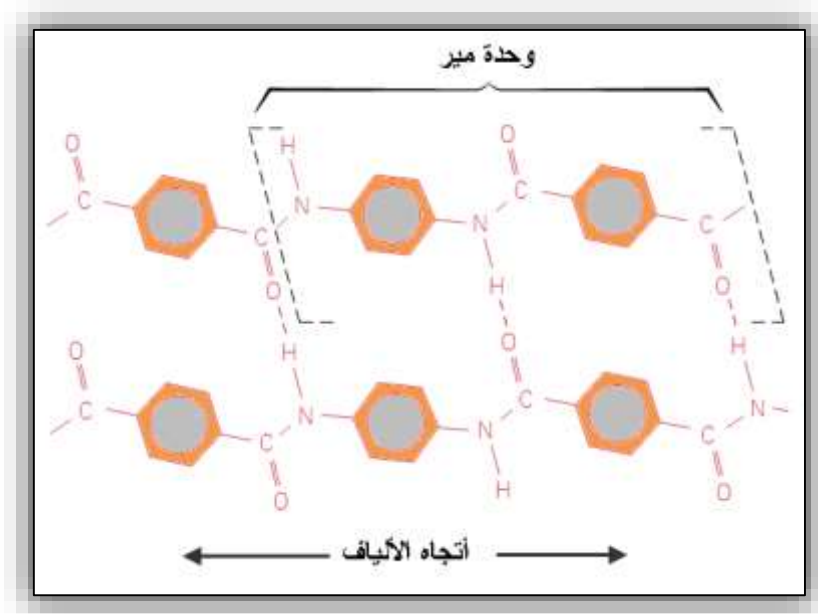
تمتلك مواد ألياف الأراميد صلابة و معامل مرونة عاليين وقد تم اكتشافها في بداية العام (1970). أنها أليافاً مفضلة وذلك يعود لتمييزها بنسبة الصلابة الى الوزن (الصلابة النوعية) والتي تتفوق فيها على المعادن. تعرف هذه المجموعة كيميائياً بالبولي بارافينيلين تيرافثالاميد (Poly Paraphenylene Teraphtalamide).

هنالك أنواعاً عديدة من مواد الأراميد؛ أسمائها التجارية الأكثر شهرة هي الكيفلير

(Kevlar) و نوميكس (Nomex) .

14-4-1 ألياف كيفلير المقوية لللدائن Kevlar (aramid) Fibre Reinforced Polymers.

كيفلير هو الاسم التجاري (مسجل بواسطة شركة دوبونت) لألياف (البولي - بارا - فينيلين - تيريفثالاميد) (poly-para-phenylene terephthalamid)، والتي توجد منها أصنافاً عديدة (كيفلير 29، 49 و 149) والتي تمتلك خواصاً ميكانيكية مختلفة. أثناء تحضيرها صناعياً، فإن الجزيئات الجاسئة ستصطف باستقامة باتجاه محور الليفة، كمجالات بلورية سائلة؛ كيميائية المير ونمط أصطفاف السلسلة هو كما ممثل في الشكل(14-6).



شكل (14-6) رسم تخطيطي لبنية المير والسلسلة لألياف الأراميد (كيفلير). السلاسل تصطف باستقامة مع اتجاه الألياف وتتكون الروابط الهيدروجينية بين السلاسل المتجاورة.

لقد تم تطوير هذا النوع من الألياف أساساً لاستبدال ألياف الصلب الكربوني المستخدمة في تقوية إطارات عجلات المركبات.

أهم ما تتميز به هذه الألياف هي المقاومة العالية للصدمات وكثافتها المنخفضة.

أما أهم الخواص التي تمتلكها هذه الألياف فهي:

- ❖ صلابة الشد العالية (صلابة الشد النوعية لها أكبر بخمسة أضعاف صلابة الصلب الكربوني النوعية).
 - ❖ معامل المرونة العالية.
 - ❖ حدوث استطالة قليلة جداً قبل الكسر.
 - ❖ خفيفة الوزن.
 - ❖ خاملة كيميائياً بدرجة كبيرة.
 - ❖ معامل التمدد الحراري المنخفض جداً.
 - ❖ متانة الكسر العالية (مقاومة الصدمات).
 - ❖ مقاومة للقطع عالية.
 - ❖ قابليتها للنسج.
 - ❖ مقاومة للهب.
- أما أهم عيوب هذه الألياف فهي:
- ❖ القابلية على امتصاص الرطوبة.

❖ صعوبة القطع.

❖ صلابة انضغاطية منخفضة.

هنالك تعديلات كثيرة قد تم إجراؤها على ألياف كيفلير لاستخدامها في تطبيقات أوسع منها:

- كيفلير 29 - صلابة عالية (300 MPa)، كثافة منخفضة (1440 kg/m^3) وتستخدم في صناعة صداري المضادة للرصاص، والمواد المركبة المستخدمة في صناعة الدروع، الخوذ، الحبال، الكوابل، والأجزاء البديلة عن الأسبستوس.

- كيفلير 49 - معامل المرونة العالي (131 GPa)، الصلابة العالية (3800 MPa) والكثافة المنخفضة (1440 kg/m^3) وتستخدم هذه الألياف في تطبيقات الفضاء والمركبات البحرية.

- كيفلير 149 - معامل مرونة فائق (186 GPa)، صلابة عالية (3400MPa) والكثافة المنخفضة (1470 kg/m^3) وبلورية عالية وتستخدم هذه الألياف كطور منتشر مقوي للمواد المركبة المستخدمة في صناعة الطائرات المقاتلة.

ميكانيكياً هذه الألياف تمتلك صلابة شد ومعامل مرونة (الجدول 1-14) هي أعلى من الألياف اللدائنية الأخرى؛ ولكنها نسبياً ضعيفة في الأنضغاط. بالإضافة الى ذلك فان هذه المادة معروفة بالمتانة، مقاومة الصدمات، ومقاومتي الزحف والفشل الكلاسي.

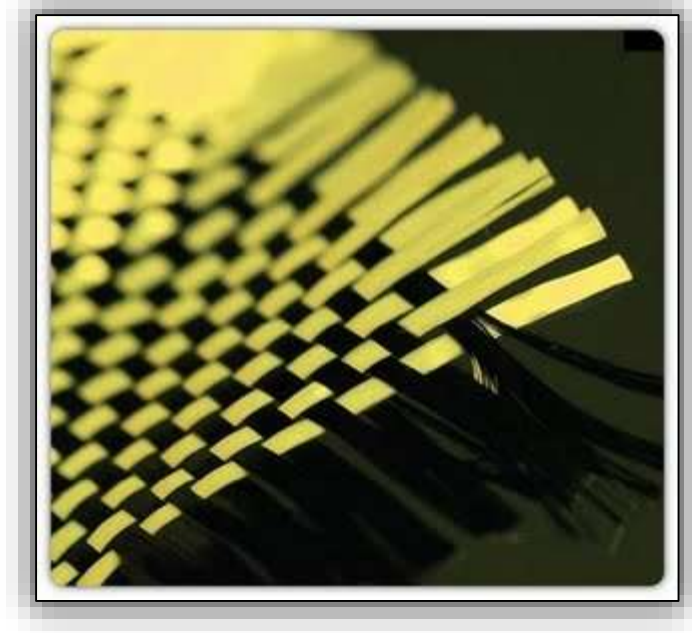
على الرغم من أن الأراميد هي مواد ثرموبلاستيك، الا انها مقاومة للأشتعال ومستقرة نسبياً عند درجات الحرارة العالية؛ مدى درجات الحرارة التي فيها تحافظ على خواصها الميكانيكية هي ما بين 200- 200 °C. فهي كيميائياً تتأثر بسرعة وتتضرر بالحوامض القوية والقواعد القوية لكنها خاملة نسبياً مع المذيبات والكيماويات الأخرى. ونتيجة لامتلاك هذه الألياف المرونة النسبية والمطولية بعض الشيء، فيمكننا أن نجري عليها عمليات النسيج الشائعة، شكل(14-7).

تنتج ألياف كيفلير بثقب المادة من خلال مغزال (Spinneret). الثقب سيضر بالتمائلية للخواص (سيزيد من الصلابة بالاتجاه الطولي) الميكانيكية للألياف. يمكن لألياف كيفلير أن تحمي الألياف الكربونية وتحسن من خواصها.

جدول (1-14) خصائص مواد الألياف المقوية.

معامل المرونة النوعي (GPa)	معامل المرونة (GPa)	الصلابة النوعية (GPa)	صلابة الشد (GPa)	الوزن النوعي	المادة
318	700	الشعيرات 9.1	20	2.2	الجرافيت
118-109	380-350	2.2-1.56	7-5	3.2	نتريد السليكون
375-175	1500-700	5.0-2.5	20-10	4.0	أوكسيد الألمنيوم
150	480	6.25	20	3.2	كربيد السليكون
		الألياف			
96	379	0.35	1.38	3.95	أوكسيد الألمنيوم
91	131	2.85-2.5	4.1-3.6	1.44	أراميد(كيفلير 49)
407-106	724-228	2.70-0.7	4.8-1.5	2.15-1.78	الكربون
28.1	72.5	1.34	3.45	2.58	الزجاج-E
156	400	1.4	3.6	2.57	البورون
133	400	1.3	3.9	3.0	كربيد السليكون
		الأسلاك المعدنية			
26.6	210	0.30	2.39	7.9	صلب ذو صلابة عالية
31.8	324	0.22	2.2	10.2	موليبدينوم
21.1	407	0.15	2.89	19.3	تنجستون

النسيج الهجين (الذي يتكون من نوعين من الألياف (كيفلير+كربون) سيشكل مجموعة ألياف ذات صلابة شد عالية جداً مع مقاومة عالية ضد الصدمات والبلية. من المواد اللدائنية الشائعة الاستخدام مع ألياف كيفلير هي الثرموستنك (كالايبوكسييدات EP، الفينيل أستر (Vinylester) والفينولات (PF) يتم تصنيع ألياف كيفلير بطرائق القوالب المفتوح والقالب المغلق والتغميس.



شكل (14-7) نسيج من ألياف كيفلير وألياف الكربون.

أن التطبيقات الشائعة لهذا النوع من المواد المركبة هو في المنتجات الباليستية (الصداري ضد الرصاص)، المنتجات الرياضية، الإطارات، أغلفة الصواريخ، الأواني الانضغاطية وكبدائل للأسبستوس المستخدم في صناعة كوابح المركبات وبطانة القوابض الاحتكاكية، والحشيات. الجدول (14-2) يبين بعض خواص الألياف المستمرة المصطفة الزجاجية، الكربونية والأراميدية المقوية للأيبوكسي كمواد مركبة. لذلك فإننا يمكن ان نعمل مقارنة بين الخواص الميكانيكية لهذه المواد الثلاثة في كلا الاتجاهين الطولي والمحاذي.

جدول (14-2) خصائص المادة المركبة اللدائنية التي طورها الأساس هو الأيبوكسي والمقواة بالألياف المستمرة الزجاجية، الكربونية والاراميدية في الأتجاهين الطولي والمحاذي. النسبة الحجمية للألياف 0.6 في جميع الحالات.

الخاصية	زجاج E-زجاج	كربون (عالي الصلابة)	أراميد (كيفلير 49)
الوزن النوعي	2.1	1.6	1.4
معامل المرونة			
بالاتجاه الطولي (GPa)	45	145	76
بالاتجاه المحاذي (GPa)	12	10	5.5
صلابة الشد			
بالاتجاه الطولي (MPa)	1020	1240	1380
بالاتجاه المحاذي (MPa)	40	41	30
أنفعال الشد الأقصى			
بالاتجاه الطولي	2.3	0.9	1.8
بالاتجاه المحاذي	0.4	0.4	0.5

14-5 الألياف الأخرى المستخدمة في تقوية اللدائن

ان الزجاج، الكربون والأراميد هي الألياف الأكثر استخداماً في تقوية الأطوار الأساسية اللدائنية. هنالك مواد أخرى لألياف تستخدم بدرجة أقل كالبورون، كربيد السليكون وأوكسيد الألمنيوم؛ خصائصها كمعامل المرونة وصلابة الشد، الصلابة النوعية، ومعامل المرونة النوعي لهذه المواد بشكل ألياف متضمنة في الجدول (1-14).

ان المواد المركبة اللدائنية المقواة بألياف البورون قد تم استخدامها في تصنيع أجزاء الطائرات الحربية، الأرياش الدوارة في الطائرات المروحية، وبعض المنتجات الرياضية. أما كربيد السليكون والألومينا (أوكسيد الألمنيوم) فيتم الاستفادة منهما في صناعة مضارب التنس، ألواح لعبة الكريكت والمقدمة المخروطية للصواريخ.

14-6 الأطوار الأساسية اللدائنية في المواد المركبة اللدائنية

أن دور الطور الأساس قد أشرنا إليه سابقاً. فبالإضافة الى ذلك فإن الطور الأساس غالباً ما يحدد الدرجة الحرارية القصوى للخدمة، نتيجة لأنه يتلين، ينصهر أو يتضرر عند درجات حرارية أدنى من الدرجات الحرارية التي ستأثر فيها الألياف المقوية.

أن المادة اللدائنية الأكثر استخداماً والأقل كلفة هي البولي يستر وأيسترات الفينيل (Vinyl Esters) وهما الطوران الأساسيان اللذان يستخدمان بصورة أساسية للمواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الزجاجية. هنالك أنواعاً عديدة من الراتجات التي تزودنا بمديات واسعة لخواص المواد المركبة اللدائنية. تعتبر الأيبوكسيدات هي المواد اللدائنية الأكثر كلفة فبالإضافة الى استخداماتها التجارية، يمكن الاستفادة منها بصورة واسعة في المواد المركبة اللدائنية المستخدمة في التطبيقات الفضائية. حيث انها تمتلك خواصاً ميكانيكية ومقاومة للرطوبة أفضل من البولي يستر وراتج الفينيل. في الاستخدامات عند درجات الحرارة العالية، فان راتج البولي إمايد هو المفضل؛ الدرجة الحرارية القصوى تقريباً 230°C .

أخيراً فإن راتجات الترموبلاستيك ذات الدرجات الحرارية العالية تقدم لنا الإمكانية في استخدامها في التطبيقات الفضائية؛ هذه المواد تشمل البولي أيثرائثريكيتون (Polyetheretherketone) أو (PEEK) وكبريتيد البولي فينيلين (Polyphenylene Sulfide) أو (PPS) والبولي أثيرايميد (Polyetherimide) أو (PEI).

14-7 تقنيات تصنيع المواد المركبة اللدائنية وتتضمن هذه الطرائق الأكثر استخداماً

يشمل اللدائن المُقَوَّى مدى واسع من المنتجات المصنوعة من راتنجات الترموبلاستيك مع ألياف موزعة بصورة عشوائية أو ألياف منسوجة. فعلى الرغم من أن الألياف الزجاجية (Fibre Glass) هي الشائعة الاستخدام إلا أن الأسبستوس والقطن والألياف الاصطناعية يتم استخدامها كذلك. يعتبر راتنج البولي يستر منخفض الكلفة وخواصه جيدة وهو الأكثر استخداماً كمادة أساس. عند التقوية يمكن تزويد الأيبوكسي بصلاية إضافية ومقاومة كيميائية عالية، بينما يستخدم السليكون حينما تكون هنالك خواص مهمة كالمقاومة للحرارة والكهربائية. هنالك راتنجات أخرى متوفرة للحصول على خواص و تطبيقات خاصة.

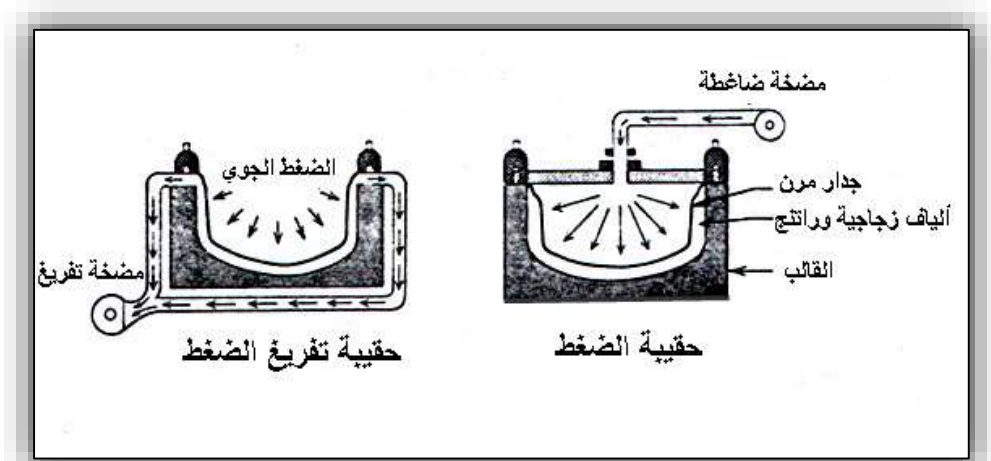
تُصنع الألياف الزجاجية والأنواع الأخرى لللدائن المُقَوَّى بطرائق مختلفة، لكنها بصورة عامة تُصنّف جميعها إلى صنفين هما القالب المفتوح والقالب المُغلق.

14-7-1 طريقة القالب المفتوح (Open Mold Method)

وهي أبسط طرائق تصنيع المواد المركبة اللدائنية وتستخدم في تصنيع الأجزاء الكبيرة (المساح، أبدان الزوارق). في عملية القالب المفتوح (Open-Mold Process) هنالك فجوة قولبة واحدة، إما مذكر أو مؤنث، حيث تُقوَّب المنتجات باستخدام ضغط قليل أو بدون استخدام الضغط. ان أبدان الزوارق المصنوعة من الألياف الزجاجية هي أحد الأمثلة الجيدة على هذا النوع، حيث تتبنى هذه الطريقة تصنيع قطع كبيرة حيث يكون فيها جانب واحد فقط جيد النهايات السطحية (التشطيب). أولاً يتم رش الطلاء النهائي في القالب، ثم توضع الألياف الزجاجية و الراتنج في القالب بصورة يدوية، تُدرفل بعد ذلك لضغطها وإزالة الهواء. مثل هذه القوالب يمكن أن تتضج بالهواء، باستخدام حقيبة مفرّغة (Vacuum Bag) أو حقيبة ضغط (Pressure Bag) ضد الجسم لتجهز الجزء المُشكل بضغط إضافي

كما مبين في الشكل (14-8). لاستخدام ضغوط أعلى، يوضع المُجمع في مكان ما

في وعاء البخار المضغوط (steam autoclave) عند ضغط يصل إلى (0.7 MPa). المنتجات الأخرى التي تنتج بطريقة القالب المفتوح تشمل أجزاء الطائرات، الحقائق، بعض أجزاء الحافلات والحاويات الكبيرة.



تستخدم هذه الطر شكل (8-14) أمثلة على إنتاج اللدائن المقوى بطريقة القالب المفتوح. وفي

بعض الأحيان مع الأيوكسي أو الفينيلستر) كمادة أساس. أما أنواع التقنيات المستخدمة في طريقة القالب المفتوح فهي:

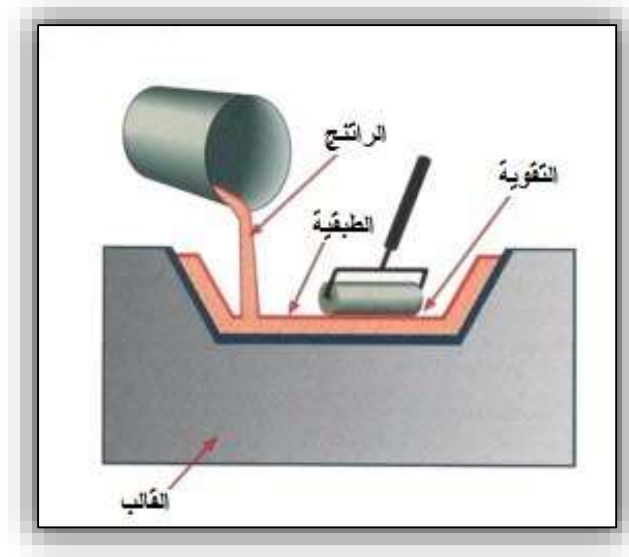
- ❖ التكديس اليدوي Hand Lay-up
- ❖ الترذيد Spray-up method
- ❖ التكديس الشريطي Tape lay-up
- ❖ اللف الخيطي Filament wending
- ❖ الإنضاج بالأوتوكلاف Autoclave curing

1-1-7-14 التكديس اليدوي Hand lay-up

وهي الطريقة الأكثر استخداماً، حيث تتم العملية يدوياً وهي عملية بطيئة وتتطلب عمالة، شكل (9-14) يبين مخططاً لهذه الطريقة وتتضمن الخطوات التالي.

- أ- يتم طلاء القالب بمادة تمنع التصاق المنتج بالقالب.
- ب- يتم وضع الطبقة الأولية للمنتج بتطبيق طلاء هلامي.
- ج- وضع طبقة من الألياف الدقيقة مكونة نسيجاً.
- د- توضع طبقة من المادة الأساس بشكل سائل راتنجي والألياف المقواة بشكل نسيج أو عشوائي أو بشكل جدائل قصيرة. خليط الراتنج يمكن أن يوضع باستخدام الفرشة أو الدرافيل.

- هـ - يتم إنضاج الجزء المراد إنتاجه (في القالب في درجة حرارة الغرفة).
و - يتم إزالة المنتج من سطح القالب.



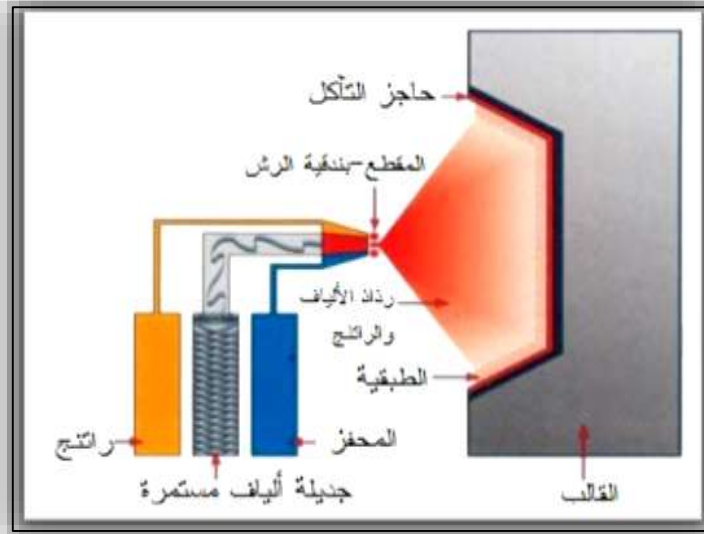
شكل (9-14) طريقة التكديس اليدوي.

أحد عيوب هذه الطريقة هي:

- أ - انخفاض تركيز الطور المقوي (لغاية 30%).
ب - وجود الفقاعات الهوائية المحصورة مما يؤدي إلى انخفاض الكثافة.

2-1-7-14 التريذ Spray-up

هنالك العديد من التقنيات التي وجدت استخداماً تجارياً في صناعة المواد المركبة اللدائنية، وواحدة منها مبينة في الشكل (10-14)، والمسماة بالتريذ السطحي (Spray-Up Process). حيث يتم فيها رش الألياف الزجاجية والراتنج بصورة تلقائية على القالب باستخدام بنادق التريذ (Spray Guns). تُصنع الزوارق والقطع الكبيرة بهذه الطريقة. في هذه الطريقة يتم تريذ كلاً من الراتنج السائل والألياف المقطعة المقوية برشاشات منفصلة على سطح القالب. يتم تقطيع الألياف إلى أطوال (25-50 mm) ومن ثم رشها باستخدام نفاث هوائي بالتزامن مع رش الراتنج بنسبة معينة ما بين الطور المقوي والطور الأساسي.

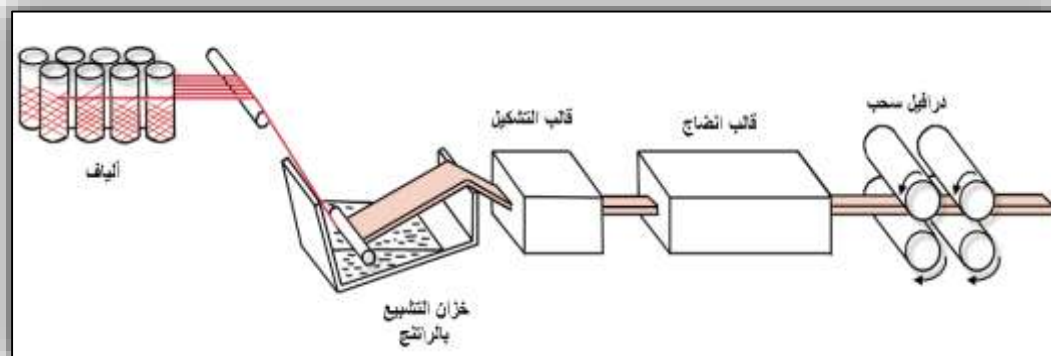


شكل(10-14) مخطط لطريقة الترنيد.

ستسمح هذه الطريقة بتكوين طبقة طلاء منتظمة للمادة المركبة، إلا أن الخواص الميكانيكية لهذه المواد ستكون متوسطة لأنها غير قادرة على استخدام التقوية بالألياف المستمرة (الطويلة).

3-1-7-14 التكديس الشريطي Tape Lay-Up

في هذه الطريقة يتم وضع طبقات (الطور المقوي المغمس بالراتنج السائل) بشكل شرائط على سطح القالب باستخدام الإنسان الآلي (الروبوت)، شكل(11-14).



شكل(11-14) طريقة التكديس الشريطي.

ثم يتم تشكيل المادة المركبة في القالب بالشكل المطلوب ثم يمرر الى غرفة التسخين ليتم إنضاج المنتج المقولب بالشكل المطلوب لأن الطور الأساس في هذه الحالة يكون من نوع لدائن

الثرموستك. يسحب بعد ذلك المنتج الناضج عن طريق درافيل سحب ليقطع بعدها بالقياسات والأبعاد المطلوبة.

4-1-7-14 الإنضاج المحمي الموصد (الأوتوكلاف) Autoclave Curing

تستخدم هذه الطريقة كطريقة مُكملة للأجزاء المُصنعة بالقالب المفتوح حيث يتم إنضاج المنتج باستخدام التفريغ (Vacuum) ثم يتبع ذلك استخدام الحرارة والضغط تحت تأثير غاز حامل. حيث يتم وضع المنتج المقولب أولاً في حقيبة لدائنية، والتي من خلالها سيتم تفريغ الهواء وذلك عن طريق استخدام مضخة تفريغ (Vacuum Pump). ان هذه العملية ستزيل الفجوات الهوائية والمواد المتبخرة من المنتج المقولب. بعد ذلك ستسلط الحرارة والضغط لغاز حامل في الأوتوكلاف مؤدياً ذلك الى تجمد المادة.

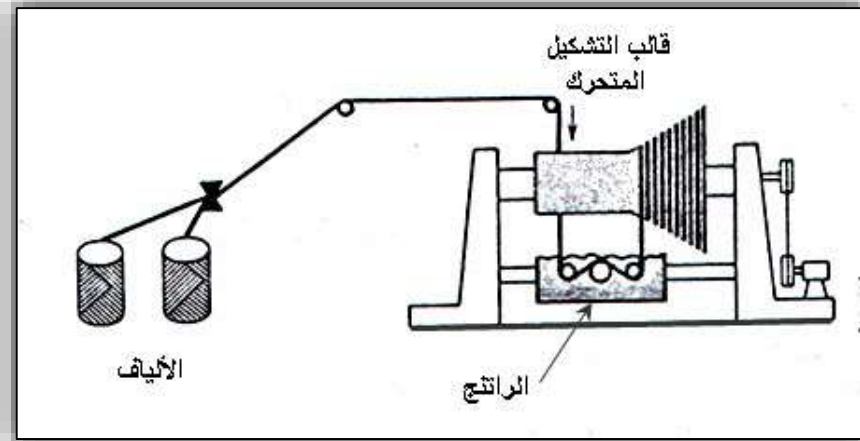
هنالك طريقتان لعملية القولية بالأوتوكلاف هما الهايدروكلاف (Hydroclave) و الثرموكلاف (Thermoclave)، بالاشتراك مع استنزاف حقيبة التفريغ (Vacuum Bag Bleeder) وقماش الإعتاق (Release Cloth). حيث يستخدم الهايدروكلاف الماء كوسيط لتسليط الضغط، بينما يستخدم الثرموكلاف مسحوق السليكون المطاطي و الذي يعمل كمائع تحت تأثير الحرارة والضغط.

ان طريقة الأوتوكلاف ستمكنا من الحصول على مواد متجانسة وتعتبر هذه الطريقة نسبياً باهظة الثمن إلا إنها تستخدم في صناعة المنتجات ذات الجودة العالية والمستعملة في التطبيقات الفضائية كالمطائرات والمركبات الفضائية.

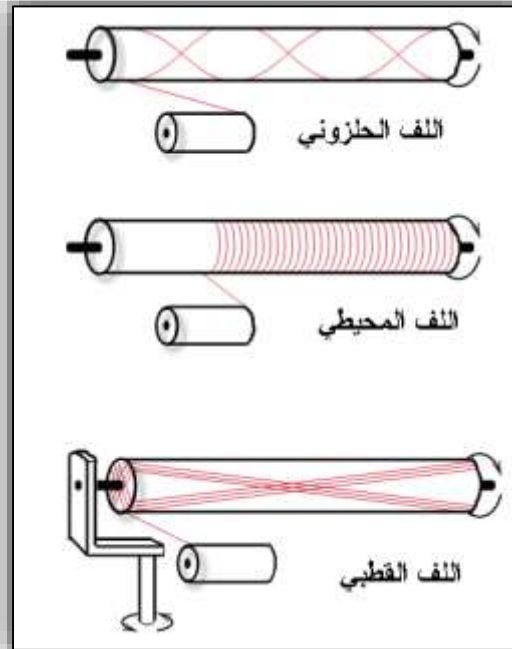
5-1-7-14 اللف الخيطي Filament Winding

هذه الطريقة تشمل استخدام خيوط مستمرة من المادة المقوية ولفها بدقة حول قالب التشكيل الدوار لتكون منتج مجوف يتألف من عدة طبقات مختلفة كما مبين في الشكل (14-12). أن هذه الألياف قد تكون بشكل جدائل أو تسحب بشكل فردي، وعادةً باستخدام معدات لف مؤتمتة. عند استخدام سائل راتنجي من نوع الثرموستك على الخيوط خلال عملية اللف، فإن الطريقة تسمى باللف الخيطي الرطب. أما إذا تم رش الراتنج بالترذيذ على القالب مع عملية اللف فيطلق عليه في هذه الحالة اللف الخيطي الجاف.

فبعد عملية لف عدد من طبقات الألياف المناسبة وتكديسها فوق بعضها البعض، يتم الإنضاج خارجاً أما عن طريق فرن أو عند درجة حرارة الغرفة، بعدها يزال قالب



شكل (12-14) طريقة اللف الخيطي.



شكل (13-14) رسم تخطيطي يمثل تقنيات اللف الحلزوني والمحيطي والقطبي المستخدمة في تقنية اللف الخيطي.

التشكيل. هنالك أنماطاً مختلفة لللف، شكل (13-14)، فيمكن أن تكون محيطية أو حلزونية أو قطبية وذلك من أجل الحصول على الخصائص الميكانيكية المطلوبة. ان المنتجات الملفوفة خيطياً ستمتلك نسبة عالية جداً من الصلابة الى الوزن (الصلابة النوعية). بالإضافة الى ان استخدام هذه التقنية سيمنحنا درجة عالية للتحكم بتجانس عملية اللف والاتجاه. علاوةً على ذلك، عندما أتمتها ستكون الطريقة اقتصادية وأكثر جذاباً. الهياكل الشائعة والمنتجة بهذه التقنية تشمل أغلفة محركات الصواريخ، أنابيب وخزانات التخزين، والأواني الإنضغاطية.

تقنيات التصنيع الحديثة تُستخدم الآن لإنتاج أشكال هيكلية مختلفة وليست بالضرورة أن تدور سطوحها (كالأعمدة ذات المقاطع بشكل حرف I). أن هذه التقنية تتطور بسرعة وذلك يعود لتأثيرها الكبير على الكلفة.

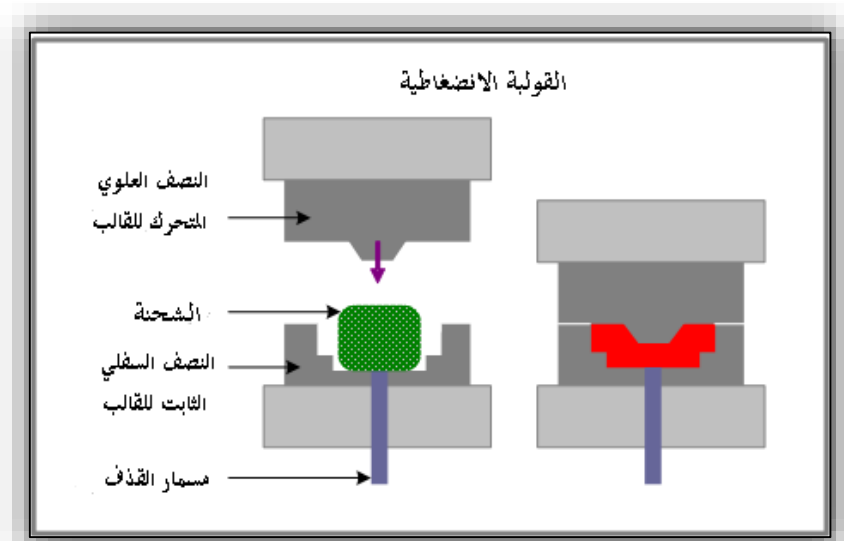
2-7-14 طريقة القالب المغلق Closed Mold Method

وتستخدم هذه الطريقة عندما يكون الإنتاج المطلوب متماثل في الشكل ودرجة تشطيبه جيدة في كلا الجهتين (الخارجية و الداخلية). حيث تستخدم هذه الطريقة في تصنيع المواد المركبة اللدائنية المقواة بالألياف الزجاجية أو الكربونية أو الكيفلر.

في طريقة القالب المغلق (Closed Mold Process) يتم استخدام قالب يتألف عادةً من جزأين مصنوعين من المعدن. يتم الحصول على تشطيباً جيداً لكلا الجهتين من سطحي المنتج. كلفة العمل قليلة، ويمكن الحصول على معدل إنتاج عالي بسبب إمكانية تسخين القالب. المنتجات التي يمكن إنتاجها بهذه الطريقة هي الحقائب، الخوذ، الصواني وأغلفة المكائن. وبصورة عامة تُستخدم للمنتجات الصغيرة الحجم بسبب التكلفة العالية لقوالب هذه الطريقة. هنالك ثلاث تقنيات تستخدم هذه الطريقة وهي:

1-2-7-14 القوالب الانضغاطية Compression Molding

وهي إحدى أنواع القوالب المغلقة والتي فيها تعصر الشحنة التي تكون في قالب مسخن مبدئياً، لتأخذ شكل فجوة القالب ويتم الإنضاج نتيجة للتقاطع الجزيئي (Cross-Linked) الحاصل كنتيجة للحرارة والضغط المسلطين على المادة. تستخدم هذه الطريقة قالب يتألف من نصفين باستخدام مكابس هيدروليكية، كما مبين في الشكل (13-14).



الشكل (13-14) طريقة القوالب الأنضغاطية لتشكيل المواد المركبة اللدائنية.

وتتضمن طريقة القولية الإنضغاطية الخطوات التالية:

1. تُخلط كمية معينة من اللدائن (في الغالب راتنج الثرموستيك) مع ألياف قصيرة مُقطّعة بالإضافة إلى استخدام عامل مُصلد و عامل ضد الالتصاق وتوضع الشحنة في القسم السفلي من القالب.
 - يمكن ان تكون الشحنة كمسحوق أو معجون أو حبيبات أو صفائح مسبقة التشكيل. وتسخن الشحنة قبل وضعها في القالب مما سيؤدي إلى تليينها وسينتج عن ذلك دورة تشكيل قصيرة.
 2. يتحرك الجزء العلوي من القالب إلى الأسفل أثناء عملية التشكيل وهذا سيؤدي إلى كبس الشحنة وإجبارها على ملئ فجوة القالب.
 - يجهز القالب عادةً بنظام تسخين للحصول على الإنضاج (التقاطع الجزيئي) للمادة اللدائنية (في حالة استخدام راتنج من نوع ثرموستيك).
 3. يفتح القالب ويقذف المنتج عن طريق مسامير القذف.
 - ان الفترة الزمنية للدورة الواحدة للقولبة هي حوالي (1-6) دقائق وهي أطول من دورة القولية بالحقن.
- هذه الطريقة مناسبة للإنتاج الكمي للأشكال المُسطّحة أو المنحنية بشكل بسيط.

2-2-7-14 القولية بالحقن Injection Molding

وهي إحدى طرائق القالب المغلق وفيها يتم خا ط منصهر اللدائن (في الغالب ثرموبلاستيك) مع ألياف قصيرة جداً بنسبة (10-40%) وتجبر باستخدام ضغط عالي بالمرور إلى فجوة القالب من خلال فتحة المصب، كما مبين في الشكل (14-14). يكون الخليط (اللدائن+الألياف) بشكل حبيبات كروية (Pellets) تغذى إلى آلة القولية بالحقن من خلال القادوس (Hopper) ثم تدفع الشحنة إلى الأمام باستخدام لولب التغذية الذي سيجبر الشحنة أن تملأ الفجوة الموجودة بين نصفي القالب من خلال نظام التغذية الذي يحتوي على بوابة المصب والمجاري.

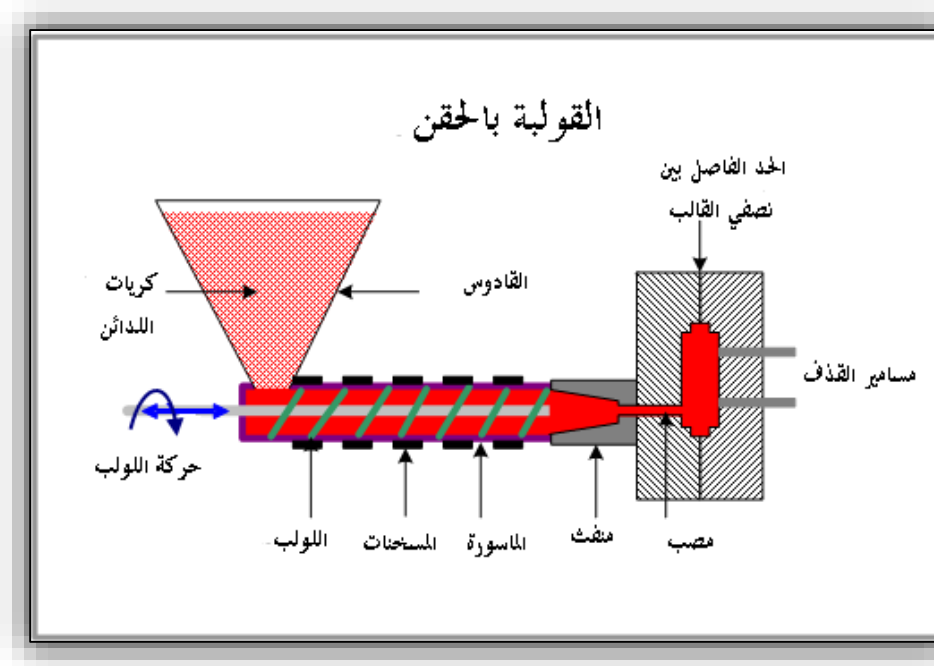
يطلق على آلات القولية بالحقن باستخدام اللولب اسم اللولب الترددي وذلك لأنه لا يدور فقط بل يتحرك إلى الأمام ويرجع ذلك بحسب خطوات دورة القولية.

إنه يعمل كذراع في مرحلة التعبئة عندما يتم حقن الخليط المنصهر (اللدائن+الألياف) داخل القالب ومن ثم يرجع إلى الخلف في مرحلة القولية.

يتم تثبيت ملفات التسخين حول ماسورة الحقن وستعمل على تليين وصهر المادة اللدائنية المستخدمة. يتم تجهيز القالب بنظام تبريد للتحكم في عملية التبريد والتجمد للمادة.

يتم الإبقاء على المنتج اللدائني في القالب حتى يحدث التجمد ومن ثم يتم فتح القالب وإزالة المنتج من القالب باستخدام مسامير القذف.

تستخدم تقنية القولية بالحقن بصورة رئيسية للمواد المركبة اللدائنية التي أساسها اللدائن من نوع الثرموبلاستيك إلا أن اللدائن من نوع الثرموسستك يمكن أن تحقق كذلك. في هذه الحالة سيحدث التقاطع الجزئي خلال عمليتي التسخين والصر لللدائنية في ماسورة التسخين.



شكل (14-14) طريقة القولية بالحقن لتصنيع المواد المركبة اللدائنية.

إن القولية بالحقن هي طريقة ذات إنتاجية عالية وستزودنا بدقة عالية ويمكن السيطرة على شكل الجزء المُصنَّع. وهذه الطريقة مريحة عند استخدامها للإنتاج الكمي عندما يتطلب منا أن تكون الكمية المنتجة كبيرة في العدد ومتماثلة في الشكل.

3-2-7-14 القولية الانتقالية (Transfer Molding)

هي إحدى تقنيات القالب المغلق والتي يتم وضع وزن معين من اللدائن المسخن مسبقاً في غرفة منفصلة (بودقة متنقلة) ومن ثم تجبر بملء قالب مسخن مسبقاً مملوء بالألياف التقوية. سيعمل ذلك على أخذها لشكل فجوة القالب وتشريب الألياف وإنجاز الإنضاج نتيجة للحرارة والضغط المسلطين على المادة.

لقد استخدمت هذه الطريقة بصورة أولية للمواد المركبة اللدائنية التي تستخدم مادة أساس من نوع الثرموسستك، إلا أن بعض المنتجات المصنوعة من الثرموبلاستيك ربما يمكن كذلك إنتاجها بهذه الطريقة.

الشكل (14-15) المبين يوضح طريقة القولية الانتقالية. حيث أن هذه العملية تشمل استخدام قالب منفصل وشفيرة ثالثة معدة لتكون كمكبس يثبت على مكبس هيدروليكي. إن هذه الطريقة تمثل تركيبة مشتركة من القولية الإنضغاطية والكبس الهيدروليكي، حيث أن نفس مواد القولية تستخدم (الثرموستت) والقولية بالحقن - الكباس، مائة القالب من خلال المصب.

أهم مراحل القولية الانتقالية هي:

أ- ملء فجوة القالب بالألياف المقوية.

ب- وزن كمية محددة من اللدائن وخطها بالإضافات والحشوات وستكون الشحنة التي ستوضع في البودقة الانتقالية. الشحنة يمكن أن تكون بشكل مسحوق، حبيبات، كمعجون، أو كقطعة معدة للتشكيل، يتم تسخين الشحنة في البودقة حيث يؤدي ذلك إلى تلينها.

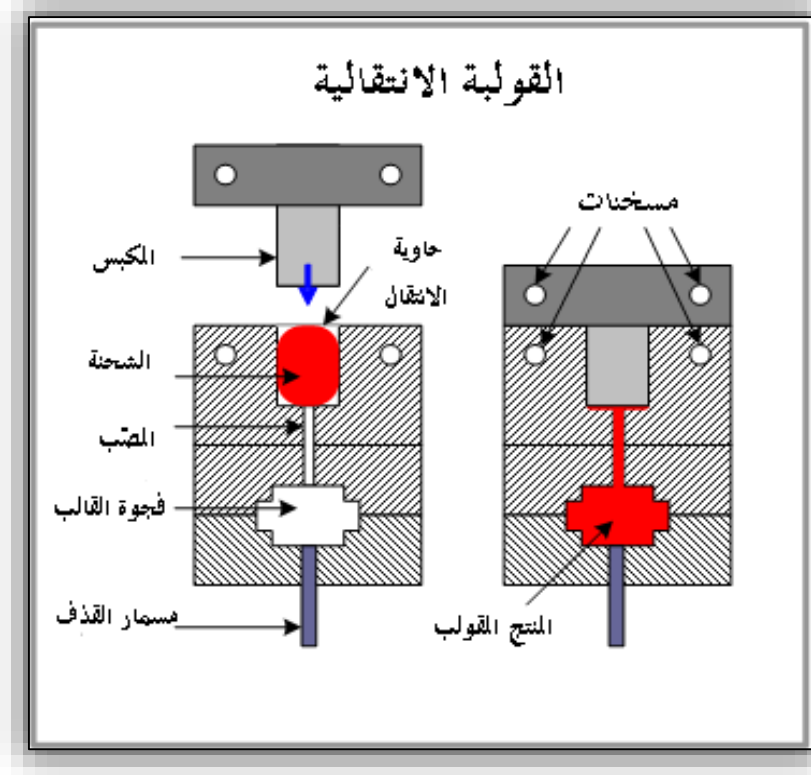
ج- يمكن ان يثبت الكباس (Plunger) على الشفيرة العليا ويتحرك للأسفل باتجاه الشحنة اللدائنية ويجبرها على ملء الفجوة في القالب من خلال المصب وتتسرب الألياف بالمادة اللدائنية. القالب مجهز بنظام تسخين يزودنا بالإنضاج (التقاطع الجزئي) لللدائن (في حالة استخدام الثرموستت).

د- يفتح القالب ويتم إزالة المنتج عن القالب باستخدام مسامير القذف. إذا كانت المادة اللدائنية المقولبة من نوع راتنج الثرموستت فإن القالب يمكن أن يفتح وهو ساخن - حيث أن الإنضاج للثرموستت سيبقيه دقيق الأبعاد حتى في الحالة الساخنة. أما إذا كان من نوع الثرموبلاستيك فإن القالب والمنتج المقولب يجب أن يبردا قبل الفتح.

هـ- الزوائد تترك عند استقبال البودقة (كنفاية)، في المصب والقنوات ويتم إزالتها. حيث إن نفايات راتنج الثرموستت لا يمكن إعادة استخدامها.

إن الفترة الزمنية لدورة الإنتاج في هذه الطريقة هي أقصر من القولية الإنضغاطية إلا أنها أطول من فترة القولية بالحقن.

هذه الطريقة يمكن إنتاج أجزاء كبيرة فيها (كدروع أبدان السيارات) والأشكال الأكثر تعقيداً مما تنتجه طريقة القولية بالضغط إلا أنها ليست كتعقيد القولية بالحقن.



الشكل (14-15) طريقة القولبة الانتقالية لتصنيع المواد المركبة اللدائنية.

8-14 المواد المركبة الهجينة Hybrid Composites

نسبياً هي مواد مركبة مقواة بالألياف ويطلق عليها بالمواد المركبة الهجينة، لأنها تستخدم نوعين من الألياف في طور أساس واحد. فهذه المواد تمتلك توليفة من الخواص أفضل من الخواص التي تمتلكها المواد المركبة المقواة بنوع واحد من الألياف. هنالك أنواعاً مختلفة من التوليفات المستخدمة للألياف مع الطور الأساسي ولكن الأكثر شيوعاً هو الألياف (الزجاجية-الكربونية) مع راتنج لدائني.

ان الألياف الكربونية هي أليافاً صلبة ونسبياً جاسئة وستزود المادة المركبة بتقوية منخفضة الكثافة إلا إنها كما أشرنا سابقاً مكلفة. أما الألياف الزجاجية فهي غير مكلفة ولكنها تفتقر الى جساءة الكربون. أن التهجين بألياف الزجاج-الكربون سيكون أقوى وأكثر متانة وسيكسبها مقاومة صدمات عالية، وستتمكن بإنتاجها بكلفة أقل بالمقارنة مع اللدائن المقواة بأما بالألياف الكربونية أو الزجاجية.

هنالك طرائق عديدة يمكن بواسطتها تركيب نوعان من الألياف المختلفة المواد سوية، والتي ستؤثر في النهاية على الخواص العامة. فعلى سبيل المثال، يمكن ان تكون الألياف جميعها مصطفة باستقامة ومختلطة بتألف مع بعضها البعض؛ أو يمكن أن تكون منشأة بشكل طبقات تتألف كل طبقة من نوع من الألياف ويكون ترتيبها متبادلاً.

ان جميع خواص المواد المركبة الهجينة عملياً هي غير متماثلة في الاتجاهات المختلفة. فعندما تتعرض المواد المركبة المهجنة إلى إجهادات الشد، فان الفشل سيكون غير كارثياً (لا يحدث فجأة). فالألياف الكربونية ستتهار أولاً، في الوقت الذي سينتقل فيه الحمل الى الألياف الزجاجية. عندما تقبل الألياف الزجاجية بتحمل الحمل، على الطور الأساس ان يتحمل الحمل المسلط. في النهاية سيحدث الفشل للمادة المركبة متزامناً مع فشل الطور الأساس. الاستخدامات الرئيسية للمواد المركبة الهجينة ستكون في الأرضيات ذات الأوزان الخفيفة، المكونات الهيكلية لنقل الهواء أو الماء، الأجهزة الرياضية.

أسئلة الفصل

1. بالنسبة للمواد المركبة اللدائنية:
 - أ- أذكر ثلاثة خصائص للطور الأساس لهذه المواد؛
 - ب- قارن بين الخصائص الميكانيكية المطلوبة لظوري الأساس والمنتشر.
 - ج- أذكر سببين لماذا يجب أن تكون هنالك روابط قوية عند السطوح البينية بين الألياف والطور الأساس.
2. لتوليفة تتكون من ألياف الزجاج - أليوبوكسي كمادة أساس، كانت النسبة بين الطول الحرج للألياف - قطر الألياف هي 50. أستخدم البيانات في الجدول (1-14) لتحديد صلابة الرابطة بين الألياف-المادة الأساس.
3. أذكر الفرق بين الكربون والجرافيت؟
4. اذكر الأسباب التي تجعل من الألياف الزجاجية مفيدة في تطبيقات واسعة؟
5. ما هي عيوب المواد المركبة المقواة بالألياف الزجاجية؟
6. ما هي المواد المركبة الهجينة؟ وأين تستخدم؟
7. أذكر فائدتين للمواد المركبة الهجينة بالمقارنة مع المواد المركبة المقواة بالألياف العادية.
8. أكتب معادلة لتحديد قيمة معامل المرونة لمادة مركبة هجينة والتي فيها جميع الألياف ولكلا النوعين موجهة بنفس الاتجاه.
9. أستخدم معادلة معامل المرونة في السؤال السابق لحساب معامل المرونة في الاتجاه الطولي للمادة المركبة المهجنة التي تتألف من ألياف الأراميد-الزجاج بنسب حجمية هي 30% و 40% بحسب الترتيب، المتضمنة في المادة الأساس التي هي راتنج البولي يستر $E_m = 2.5$.GPa

الفصل الخامس عشر:

المواد المركبة السيراميكية

(المواد التي أساسها السيراميك)

Ceramic Matrix Composite (CMC)

1-15 مقدمة

بموجب التصنيف للمواد المركبة فإن المواد المركبة السيراميكية تتألف من مواد أساسها السيراميك وتتراكب مع مواد سيراميكية كذلك (أكاسيد، كبريدات) كطور منتشر. أهم ما تتميز به هذه المواد هو مقاومتها للأكسدة والتدهور عند درجات الحرارة العالية. أن هذه المواد ستكون مرشح مثالي للاستخدام عند درجات الحرارة العالية والاجهادات الشديدة، خاصة عندما تصنع منها أجزاء المحركات للمركبات والمحركات التوربينية الغازية في الطائرات.

لقد تم تصميم المواد المركبة السيراميكية لتحسين المتانة للمواد السيراميكية التقليدية والتي أهم عيوبها هو الهشاشة. لقد تم تحسين متانة التصدع للمواد السيراميكية بتميز نتيجة لتطور الجيل الجديد من المواد المركبة السيراميكية. حيث تم استخدام الدقائق، الألياف، والشعيرات المصنعة من مواد سيراميكية وتضمينها في المادة الأساس السيراميكية.

تقوى المواد المركبة السيراميكية بالألياف مستمرة (طويلة) أو بألياف غير مستمرة (قصيرة). إن المواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة يتم إنتاجها بطرائق السيراميك التقليدية وتصنع من الأكسيد (الألومينا) أو غير الأوكسيدية (كربيد السليكون). المواد المركبة السيراميكية المقواة بالشعيرات (Whiskers) المصنوعة من كربيد السليكون، بوريد التيتانيوم (TiB_2)، نتريد الألمنيوم (AlN)، وأكسيد الزركونيوم (ZrO_2) وأليافاً سيراميكية أخرى. إن غالبية المواد المركبة السيراميكية يتم تقويتها بألياف كربيد السليكون نظراً لصلابتها العالية وجسائتها العالية.

يمكن دمج الشعيرات مع الألياف القصيرة المتوفرة في المواد المركبة السيراميكية لتحسين متانتها ومقاومتها لنمو التشققات. إلا أن خصائص الفشل للمواد المركبة المقواة بالألياف القصيرة هو من نوع الكارثي (Catastrophic).

المواد المركبة السيراميكية المقواة بالألياف الطويلة تكون مقواة إما بألياف طويلة أحادية الشعيرات أو ألياف طويلة متعددة الشعيرات.

إن أفضل تأثير على الصلابة يمكن الحصول عليه من الطور المنتشر عندما يكون في شكل ألياف أحادية الشعيرات مستمرة، والتي تصنع بطريقة الترسيب الكيميائي للبخار (Chemical Vapor Deposition) كريد السليكون على طبقة سفلية من ألياف التنجستون أو الكربون. ينتج عن الألياف الأحادية الشعيرات روابط بينية أقوى مع المادة الأساس وسيحسن ذلك المتانة. إن خصائص الفشل للمواد المركبة السيراميكية المقواة بالألياف الطويلة هو ليس من النوع الكارثي.

15-2 الخواص الشائعة للمواد المركبة السيراميكية

ان أهم ما تتميز به هذه المواد هو:

☒ الصلابة العالية حتى عند درجات الحرارة العالية.

☒ المقاومة العالية ضد الصدمات الحرارية.

☒ الصلابة العالية.

☒ المتانة العالية.

☒ الاستقرار الحراري العالي.

☒ الكثافة المنخفضة.

☒ المقاومة العالية ضد التآكل وحتى عند درجات الحرارة العالية.

المواد الأساس التي تستخدم في صناعة المواد السيراميكية المقواة بالألياف الطويلة هي كريد السليكون، الألومينا (الألومينا السيليكا) أو الكربون.

15-3 المواد المركبة السيراميكية التي أساسها كريد السليكون

وتصنع بطريقة الترشيح الكيميائي للبخار (Chemical vapor Infiltration) أو الترشيح بالطور السائل (Liquid Phase Infiltration) للمادة الأساس وتشكل وتحضّر من ألياف كريد السليكون.

تستخدم هذه المواد في صناعة بطانة الاحتراق للمحركات التوربينية الغازية، مراوح التدوير للغازات الساخنة، المبادلات الحرارية، مكونات الدفع للصواريخ، المرشحات للسوائل الساخنة، أجزاء مشاعل الغاز، معلقات أنابيب الأفران، أنابيب المشاعل الغاطسة.

15-4 المواد المركبة السيراميكية التي أساسها الألومينا والألومينا- سيليكات (المولاييت):
ويتم تصنيعها بتقنية الهلام - المحلول الغرواني (Sol-Gel Method)، الأكسدة المباشرة للمعدن أو الترابط الكيميائي.

يستخدم هذا النوع من المواد المركبة السيراميكية في صناعة المبادلات الحرارية، المرشحات للسوائل الساخنة، مشاعل الحرارة - الفلطائية الضوئية، موازن المشاعل، بطانة الاحتراق في مشاعل محركات التوربين الغازية.

15-5 المواد المركبة السيراميكية التي أساسها الكربون والمقواة بالكربون (Carbon - Carbon Composite)

وتصنع بطرائق الترشيح البخاري الكيميائي (Chemical Vapor Infiltration) أو الترشيح بالطور السائل (Liquid-Phase Infiltration) للمادة الأساس وتشكل وتحضر من ألياف الكربون.

تستخدم هذه المواد في صناعة أنظمة المكابح العالية الأداء، المكونات الحرارية (Refractory Compounds)، قوالب الكبس على الساخن، ملفات التسخين، مكونات المحركات التوربينية النفاثة.

**15-6 تصنيع المواد المركبة السيراميكية بطريقة الترشيح البخاري الكيميائي
Fabrication of Ceramic Matrix Composites by Chemical Vapor Infiltration (CVI)**

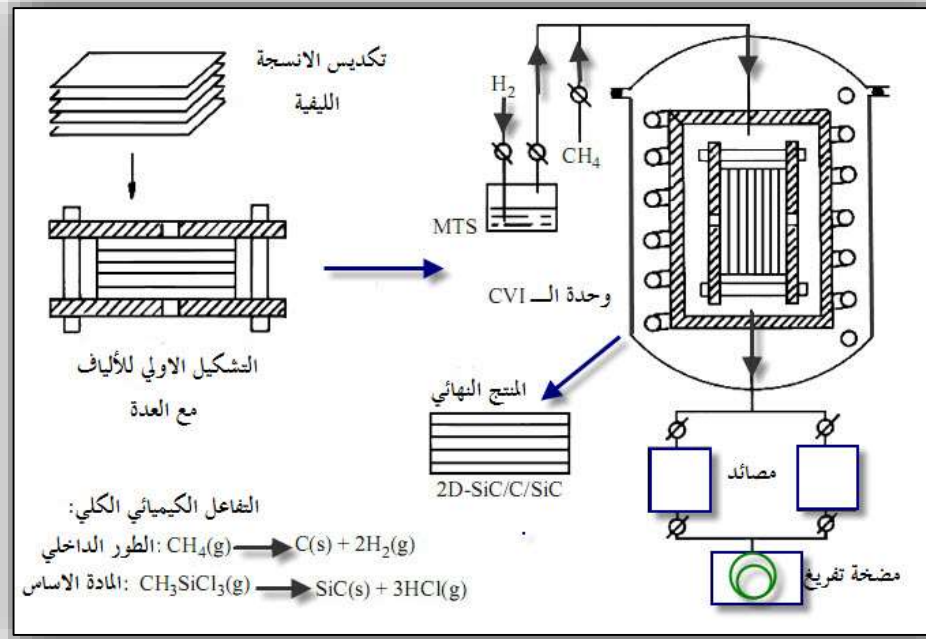
وهذه العملية التي فيها تنتشر الغازات المتفاعلة خلال جسم مسامي متساوي درجة الحرارة ومسبق التشكيل، يصنع من ألياف طويلة ومستمرة، مكوناً الترسيب. ستتكون المادة المترسبة نتيجة للتفاعل الكيميائي الذي يحدث على سطوح الألياف.

سيملأ الترسيب الفراغات الموجودة بين الألياف، مكوناً المادة المركبة التي فيها المادة الأساس ستكون مادة مترسبة والطور المنتشر هو ألياف مسبقة التشكيل.

تستخدم هذه التقنية بصورة واسعة في تصنيع المواد المركبة السيراميكية التي أساسها كربيد السليكون والمقواة بالألياف الطويلة (المستمرة) والمصنوعة من كربيد السليكون كذلك.

يتم تصنيع كربيد السليكون كمادة أساس من خليط من المثلث تري كلوروسيلين (Methyltrichlorosilane) والهيدروجين.

إن العملية CVI الأيزوثرمية، شكل (15-1) ستكون بطيئة جداً بسبب انخفاض معدل الانتشار.



شكل (1-15) أساسيات طريقة I-CVI (الأيزوثرمية) لتصنيع مواد مركبة سيراميكية لألياف ذات بعدين (2D) كالكربيد السليكون كمادة أساس.

هنالك ثلاث تحويلات لطريقة CVI سوف تعزز من معدل الترسيب وهي:

1- الترشيح البخاري الكيميائي بالانحدار الحراري

Temperature – Gradient CVI

وهي طريقة CVI والتي يكون فيها معدل الترسيب قد ازداد نتيجة للانحدار الحراري (التغير في درجة الحرارة) في المادة المسبقة التشكيل.

2- الترشيح البخاري الكيميائي بالتدفق القسري Forced Flow CVI

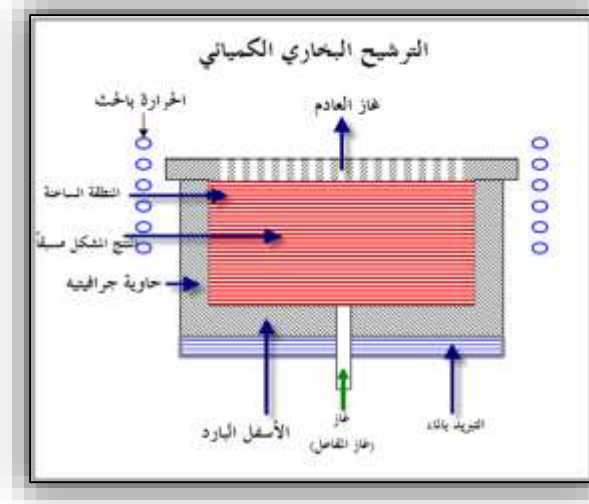
وهي إحدى طرائق الـ CVI التي فيها يحدث زيادة في معدل الترسيب نتيجة للتغير في الضغط (الانحدار في الضغط) مجبراً الغازات المتفاعلة بأن تتغلغل في المادة المسبقة التشكيل.

3- الترشيح البخاري الكيميائي بالضغط النبضي

Pressure-Pulsed CVI (P-CVI)

وهي إحدى طرائق الـ CVI التي فيها يشمل تطبيق ضغط متغير للغازات المتفاعلة وسينتج عن ذلك ترسيب متعدد الطبقات.

الشكل (2-15) يبين مخطط لطريقة الترشيح البخاري الكيميائي.



شكل (15-2) طريقة الترشيح البخاري الكيميائي.

العملية المبينة تمثل مزيج من الانحدار الحراري والانحدار في الضغط لتخفيض زمن التجمد (Densification). ان التغير في درجة الحرارة سينجز عن طريق تسخين المنطقة العليا لها عندما تكون المنطقة السفلى باردة. أما التغير في الضغط فيحصل عليه عندما يكون الفرق في الضغط بين الغازات الداخلة والخارجة.

7-15 تصنيع المواد المركبة السيراميكية الأساس بطريقة الترشيح بالطور السائل

حيث تستفيد هذه الطريقة من الترشيح لسائل داخل ألياف مستمرة طويلة وهناك أربعة طرائق تستخدم في هذه التقنية وهي:

1-7-15 ترشيح السيراميك المنصهر

Infiltration of Molten Ceramic

وهذه الطريقة لترشيح المواد السيراميكية المنصهرة داخل ألياف مشكلة مسبقاً تكون محددة وذلك نظراً للزوجة المخفضة للسيراميك المنصهر وكذلك الدرجة الحرارية العالية التي يتطلبها صهر مثل هذه المواد وهذا سيؤدي إلى حدوث تفاعل داخلي بين المادة الأساس المنصهرة والطور المنتشر (الألياف). إن هذه الطريقة هي ماثلة (لطريقة الحالة السائلة المستخدمة في المواد المركبة المعدنية) وتستخدم أحياناً في تصنيع المواد المركبة الزجاجية.

Slurry Infiltration Process

2-7-15 طريقة الترشيح الملاطي

إن هذه الطريقة تتضمن الخطوات التالية:

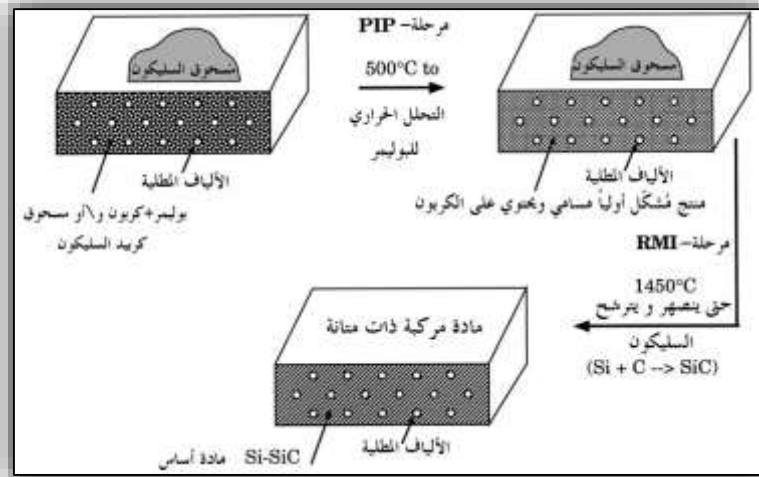
- أ- تمرير الألياف (شريط، حبل) خلال الملاط الذي يحتوي على دقائق من المادة الأساس السيراميكية.

- ب- لف الألياف المرشحة (بواسطة الملاط) حول درفيل و تجفيفها.
 ج- تكديس الألياف المشبعة بالملاط إلى الشكل المطلوب.
 د- تصليب المادة الأساس بالكبس الساخن في قالب جرافيت عند درجات حرارة عالية.

3-7-15 طريقة الترشيح بالمنصهر المفاعل

Reactive Melt Infiltration Process (RMI)

وتعتبر طريقة الترشيح هذه (الشكل 15-3)، إحدى الطرائق الأساسية التي استخدمت في تصنيع المواد السيراميكية التي أساسها كربيد السليكون. إن هذه الطريقة تشمل ترشيح الكربون (C) المسبق التشكيل في السليكون المنصهر. الترشيح يحدث عادةً نتيجة القوى الشعرية. الكربون المشكل مسبقاً والمنعمر في السائل السليكوني سيتفاعل مع السليكون مكوناً كربيد السليكون. وسينتج عن ذلك مادة أساس تحتوي على كربيد السليكون وبعض السليكون المتبقي.



شكل (15-3) أساسيات طريقة (RMI) لتصنيع مادة مركبة سيراميكية أساسها Si-SiC.

عندما يستخدم منصهر الألمنيوم لعملية الترشيح فإنه سيتأكسد في الجو مكوناً خليط من الألومينا - الألمنيوم (Al_2O_3-Al). عند استخدام منصهر الألمنيوم في عملية الترشيح سيتكون شكل أولي من الألمنيوم المتأكسد في الجو وسينتج عن ذلك خليط من الألومينا - الألمنيوم (Al_2O_3-Al) تشكل المادة الأساس. إن طريقة الترشيح بالمنصهر المفاعل هي طريقة سريعة ونسبياً أقل تكلفة. فالمواد المصنعة بهذه الطريقة ستمتلك مسامية منخفضة وموصلية حرارية عالية وكذلك موصلية كهربائية.

4-7-15 الترشيح والتحلل الحراري للبوليمر**Polymer Infiltration and Pyrolysis (PIP)**

هذه الطريقة تشمل العمليات التالية:

☒ غمس الألياف المسبقة التشكيل (أو المسحوق المكبوس) في لدائن طرية وساخنه مكونة منتج لدائني أولي.

☒ يم إنضاج المنتج بالتقاطع الجزيئي عند درجة حرارة 250°C .

☒ يتم التحلل الحراري للمنتج اللدائني عند درجة حرارة ($500-1000^{\circ}\text{C}$). ونتيجة للانحلال الحراري فإن البوليمر سيتحول إلى سيراميك.

الانحلال الحراري سيؤدي إلى تقلص المادة الأساس وتكوين المسامات (لغاية 40 vol%).

☒ المنتج اللدائني المتحلل حرارياً يمكن أن يكبس على الساخن للتليد. إلا أن الكبس الساخن سيكون محدود لاحتمالية تحطم الألياف.

☒ دورة الترشيح- الانحلال الحراري تعاد عدة مرات حتى يتم الحصول على الكثافة المطلوبة.

المواد الأساس التي تتألف من الكربون، كربيد السليكون، الأوكسي كربيد السليكون، نتريد السليكون، الأوكسي نتريد السليكون (Silicon Oxynitride) يمكن تصنيعها بتقنية ال (PIP).
المواد التالية تم استخدامها كلدائن في هذه التقنية:

1- الثرموستنك (راتنجات الثرموستنك).

2- الزفت (Pitches) أو السوائل التي تحتوي على الكربون لتصنيع الكربون كمادة أساس.

3- البولي كاربوسيلان (Polycarbosilane)، البولي سيلاستيرول (polysilastyrol)،
الدوديكاميثيل كلوهكسيلان (Dodecamethylcyclohexasilan) وذلك لتصنيع كربيد السليكون كمادة أساس.

وتعتبر هذه التقنية من التقنيات البسيطة والتي تستخدم في درجات الحرارة المنخفضة لذلك

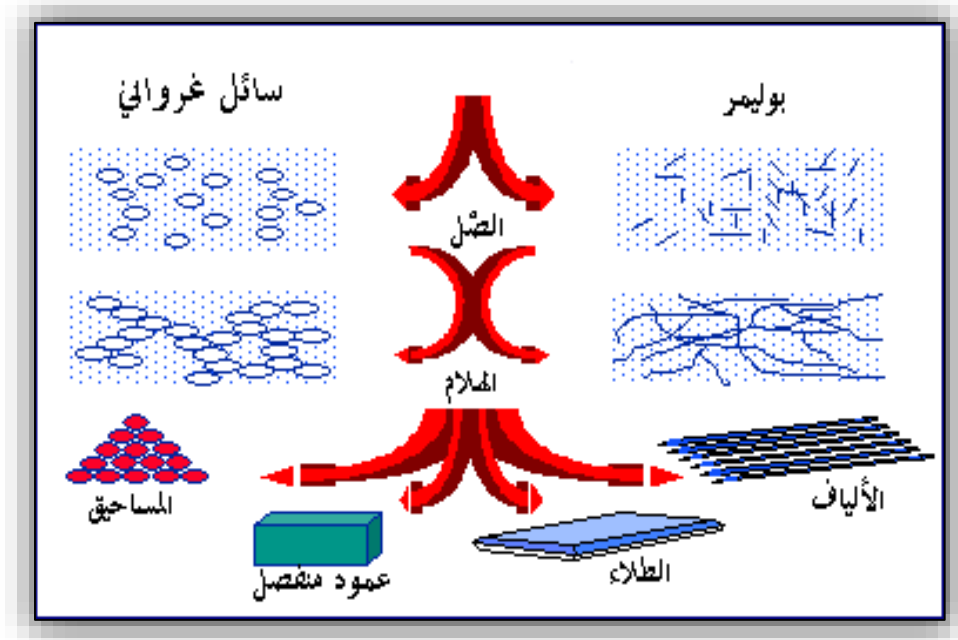
سيسمح لها بإنتاج أجزاء جوهرية (Intrinsic Parts).

8-15 تصنيع المواد المركبة السيراميكية بطريقة الصل (المحلول الغرواني)-الهلام**Fabrication of Ceramic Matrix Composites by Sol-Gel Process**

وتشمل هذه الطريقة تصنيع مكونات المواد المركبة السيراميكية وتشمل تحضير المادة

الأساس من معلق غرواني سائل (Liquid Colloidal Suspension) لدقائق سيراميكية ناعمة

(المحلول الغرواني Sol)، والذي يُنقَع (يشرَّب) إلى شكل أولي ثم يحول إلى مادة صلبة (هلامية Gel)، شكل (4-15). سيتكون المعلق الغرواني نتيجة للتفاعل الكيميائي عندما تنتشر الدقائق الصغيرة جداً بنصف قطر لغاية (100 nm) داخل السائل (الماء أو مذيب عضوي).



شكل (4-15) طريقة الصل-الهلام.

يمكن تحضير الألومينا كمادة أساس من هلام الألومينا والذي يتكون بشكل مميؤ (متحلل كنتيجة للتفاعل مع الماء) لألكوكسيدات الألومنيوم (Aluminum Alkooxides). يمتلك السائل الغرواني لزوجة منخفضة ويمكنه التغلغل بسهولة في المنتج المشكل مسبقاً. ويتم تجفيف المنتج المرشح بعد ذلك. إن عملية التجفيف هذه سينتج عنها تقلص للمادة الأساس وتكوين المسامات، لذلك تعاد دورة الترشيح- التجفيف عدة مرات حتى نحصل على الكثافة المطلوبة. المادة المنتجة ستحرق (تلبد) ثم تكبس على الساخن.

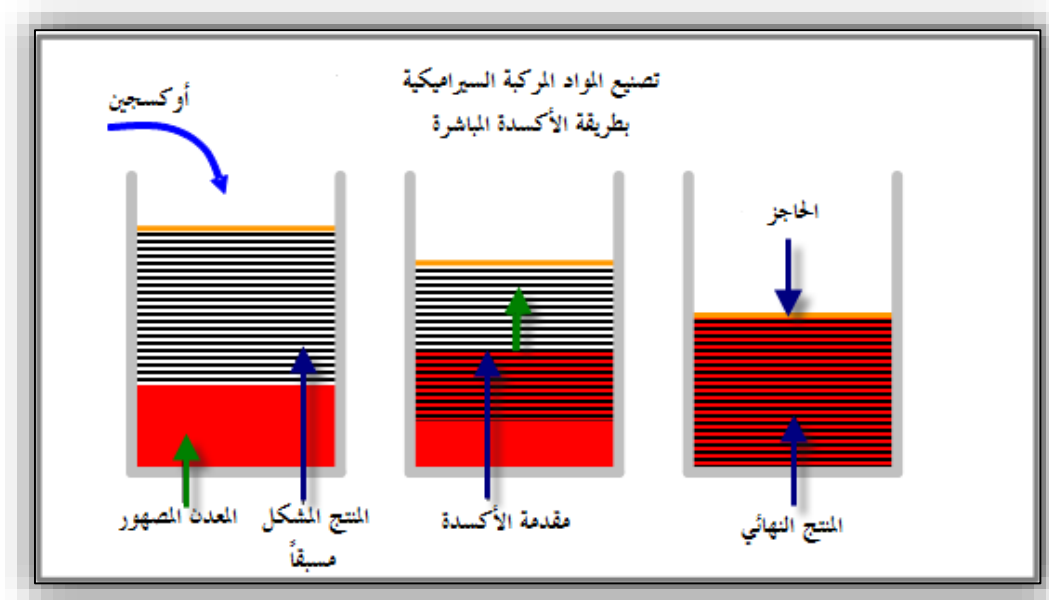
9-15 تصنيع مكونات المواد المركبة السيراميكية بطريقة الأكسدة المباشرة Fabrication of Ceramic Matrix composites by Direct Oxidation Process

إن طريقة الأكسدة المباشرة للمعدن لتصنيع المواد المركبة السيراميكية، شكل (5-15)، تشمل تشكيل المادة الأساس بالتفاعل للمعدن المنصهر مع الغاز المؤكسد.

فبعد عملية التشكيل الأولية للطور المنتشر (ألياف، دقائق) يتم وضعها على سطح المعدن المنصهر في الجو ويكون الأوكسجين هو العامل المؤكسد. الشرطان الضروريان للتوصل إلى عملية الأكسدة المباشرة هما ترطيب الطور المنتشر في محيط من الأوكسجين.

حيث تتم أكسدة المعدن المنصهر عندما يكون في تماس مع الأوكسجين مكوناً طبقة رقيقة من السيراميك مع بعض الأطوار المنتشرة المتحددة معها. حيث ستعمل القوى الشعرية على إجبار المنصهر بالتغلغل خلال الطبقة السيراميكية المسامية إلى التفاعل الأمامي حيث يتفاعل الغاز ناتجاً طبقة سيراميكية متنامية.

يتقدم المنصهر إلى مقدمة التفاعل باستمرار بمعدل يحدده معدل تفاعل الأوكسجين. سيتوقف نمو السيراميك عندما يبلغ التفاعل الأمامي الحاجز (لاحظ الشكل). بعض المعدن المتبقي (حوالي 10% من حجم المادة) سيبقى في الفراغ الحبيبي البيني للمادة السيراميكية.



شكل (15-5) طريقة الأكسدة المباشرة لتصنيع المواد المركبة السيراميكية.

ان المادة الناتجة سوف لن تحتوي على مسامات وشوائب والتي هي غالباً ما تكون موجودة في السيراميك المصنع بالتليد (مواد رابطة، ملدنات، مزلاقات، مشتتات، ماء إلخ). ان أهم عيوب طريقة الأكسدة المباشرة هي الإنتاجية المنخفضة حيث أن معدل النمو حوالي (1 mm/h).

10-15 المواد المركبة كربون - كربون Carbon- Carbon Composites

المواد المركبة كربون-كربون هي مواد تتألف من المادة الأساس الكربون المقواة بألياف الكربون. إنها أحد أكثر المواد الهندسية تقدماً ووعوداً وغالباً ما يطلق عليها مواد مركبة كربون-كربون. أن هذه المواد هي نسبياً حديثة ومكلفة ولذلك فهي لا تستخدم حالياً بصورة واسعة. خواصها المرغوبة والتي تتضمن معامل المرونة وصلابة الشد العاليين والاحتفاظ بهما لغاية درجة حرارية تزيد عن 2000 °C، مقاومة للزحف، ونسبياً تمتلك متانة كسر كبيرة. علاوة على ذلك تمتلك هذه المواد معامل تمدد حراري منخفض ونسبياً موصالية حرارية عالية؛ ان هذه الخصائص بالإضافة الى الصلابة العالية ستكسب المادة تأثيراً قليلاً بالصدمات الحرارية. ان أحد أهم عيوبها هو النزعة الى التأكسد عند درجات الحرارة العالية.

ان هذه الماد تستعمل في صناعة محركات الصواريخ، كمادة احتكاكية تستخدم في الطائرات والمركبات العالية الأداء، وكذلك في صناعة قوالب الكبس الساخن، وفي أجزاء المحركات التوربينية المتطورة، وكدروع للمركبات. أن السبب الرئيسي لكلفتها العالية يعود الى التقنيات المعقدة نسبياً المستخدمة في تصنيعها.

1-10-15 البنية الهيكلية للمواد المركبة كربون - كربون

Structure of Carbon – Carbon Composites

يمكن تصنيع هذه المواد باتجاهات مختلفة بالنسبة للطور المقوي (ألياف الكربون)، ببنية ذات اتجاهات موحدة، بنية ثنائية الاتجاهات (3 أبعاد، 4 أبعاد، 5 أبعاد... إلخ). ان هذه التقوية المتعددة الاتجاهات ستزودنا بأقصى مستوى للخواص الميكانيكية في اتجاه البنية النسيجية.

2-10-15 تصنيع المواد المركبة كربون - كربون بطريقة الترشيح بالطور السائل

وتتم حسب المراحل التالية:

- ☒ تحضير ألياف الكربون/الجرافيت، المشكل مسبقاً بالبنية والشكل المطلوبين.
- ☒ ترشيح المنتج المشكل مسبقاً بالسائل: زفت البترول / راتنج الفينول/ قطران الفحم.
- ☒ الانحلال الحراري/ الكربنة (التحلل الكيميائي بالحرارة بغياب الأوكسجين) كالمادة اللدائنية المستخدمة عند درجة حرارة (538-1000 °C) تحت الضغط الاعتيادي أو العالي.
- ☒ دورة الترشيح - الانحلال الحراري تعاد عدة مرات (3-10) مرات حتى تنجز الكثافة المطلوبة.

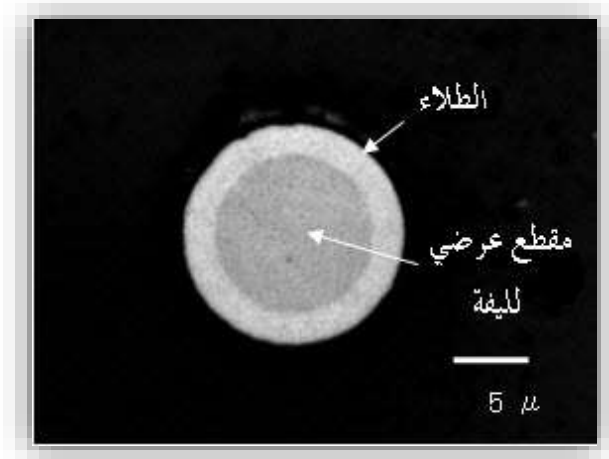
☒ إجراء معالجة حرارية تشمل الجرافطة (Graphitization) في هذه المرحلة يتحول الكربون غير المتبلور (Amorphous) إلى جرافيت متبلور. ان درجة حرارة المعالجة

ربما تتغير في المدى ($1500-3000\text{ }^{\circ}\text{C}$). ان الدرجة الحرارية الشائعة للجرفطة هي ($2500\text{ }^{\circ}\text{C}$). إن جرفطة المواد المركبة كربون - كربون سينتج عنها زيادة في معامل المرونة والصلابة للمواد المركبة.

3-10-15 تصنيع المواد المركبة كربون - كربون بطريقة ترسيب البخار كيميائياً Fabrication of Carbon - Carbon Composites by Chemical Vapor Deposition Process

وتتضمن الخطوات التالية:

- 1- تحضير الألياف (الكربون/الجرافيت) المشكلة مسبقاً بالبنية والشكل المطلوبين.
 - 2- تكثيف المواد المركبة بتقنية تحلل البخار كيميائياً (CVD). إن عملية (CVD) ستشمل الترشيح للمنتج المشكل أولاً مع غاز هيدروكربوني مضغوط (بروبان، ميثان، بروبلين، أستيلين، بنزين) عند درجة حرارة ($982-1204\text{ }^{\circ}\text{C}$). حيث سيتحلل الغاز حرارياً مكوناً الكربون المترسب على سطح الألياف، شكل (14-6). ان فترة العملية ستحدد بحسب السمك المطلوب للمنتج المشكل مسبقاً، والتي من خلالها سينتشر الغاز.
 - 3- إجراء معالجة حرارية تسمى الجرفطة (Graphitization) ففي هذه المرحلة سيتحول الكربون غير المتبلور إلى بلورات جرافيتية.
- إن عملية التصنيع للمواد المركبة كربون - كربون بطريقة ترسيب البخار كيميائياً سينتج عنها معامل مرونة وصلابة ميكانيكية أعلى من الطرائق السابقة.



شكل (15-6) طلاء كربيد السليكون لألياف كربيد السليكون بسمك 3μ .

4-10-15 خواص المواد المركبة كربون - كربون

- 1- مقاومة ممتازة ضد الصدمات الكهربائية.

- 2- معامل تمدد حراري منخفض.
- 3- معامل مرونة عاكس (200 GPa).
- 4- موصلية حرارية عالية (101 w/m.k)
- 5- كثافة منخفضة ($1.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$).
- 6- صلابة عالية.
- 7- معامل احتكاك منخفض (في اتجاه الألياف).
- 8- مقاومة حرارية ممتازة في الأجواء غير المؤكسدة. هذه المواد تحافظ على خواصها الميكانيكية لغاية (3000°C).
- 9- مقاومة عالية للتحلات.
- 10- موصلية كهربائية عالية.
- 11- فشل غير قصيف.

5-10-15 الحماية من التآكسد للمواد المركبة كربون - كربون

ان أهم عيوب هذه المواد هي المقاومة المنخفضة ضد التآكسد. ان المواد الكربونية تتفاعل مع الأوكسجين عند درجة حرارة فوق (480°C).

لقد استعملت الطرائق التالية للحماية من تآكسد المواد المركبة كربون - كربون وهي:

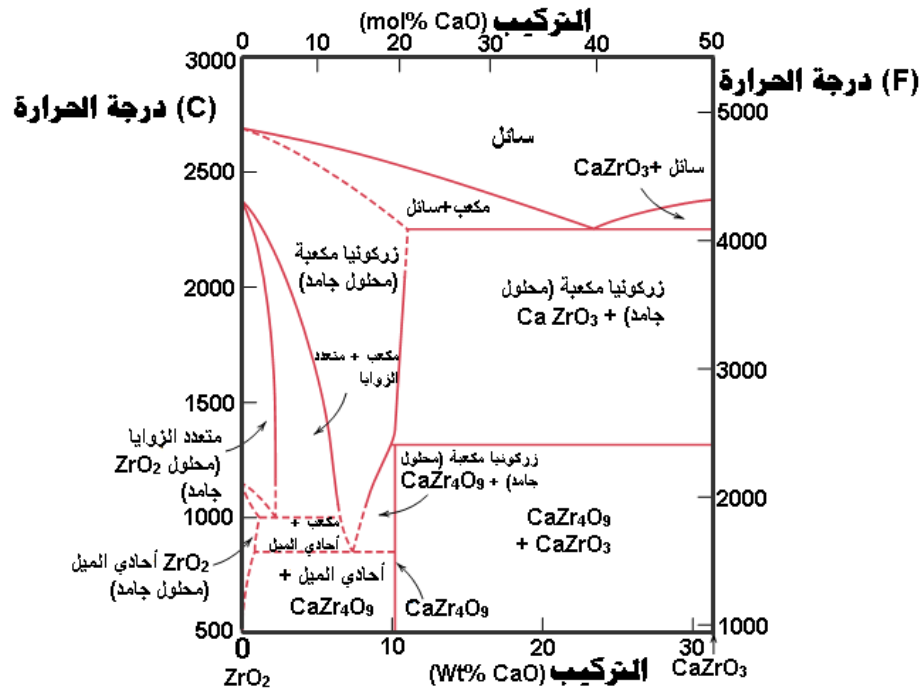
- أ- الحماية بالطلاء، حيث تستخدم الطلاءات السيراميكية (في الشائع الطبقات المتعددة) كالكريديات، النتريدات والأكاسيد. يمكن أن تترسب طبقة الطلاء بالترسيب للبخار كيميائياً (CVD)، ترسيب البخار فيزيائياً (PVD) أو بالرش بالبلازما.
- ب- التشريب بمثبطات الأكسدة؛ الأملاح غير العضوية، زجاج السيليكا والبورات (Borate)، الفوسفات، أكسيد البورون، البولي سيلوكسان (Polysiloxanes) مركبات الهالوجين.
- ج- استبدال المادة الأساس من الكربون إلى كربيد السيليكون - المواد المركبة C-SiC تمتلك مقاومة ممتازة ضد التآكسد.

6-10-15 استخدامات المواد المركبة كربون - كربون

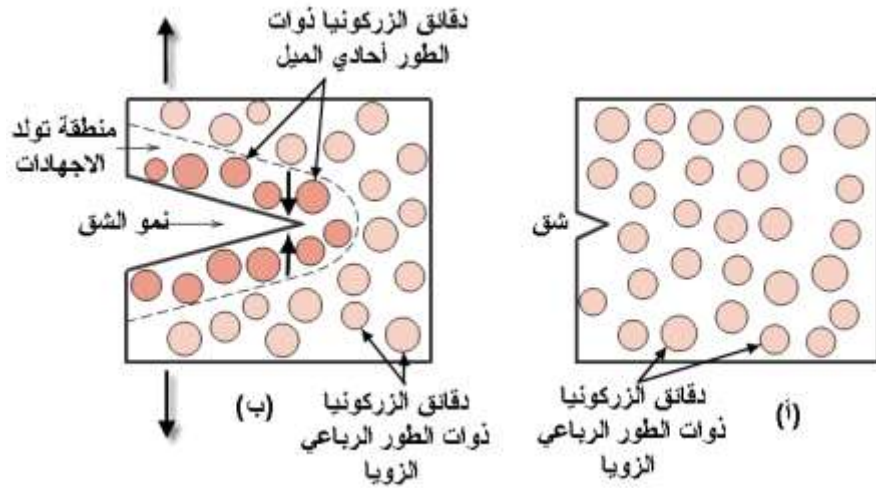
- 1- أنظمة المكابح العالية الأداء (مثل: أقراص الكبح للطائرات).
- 2- المواد الحراري (مثل: حماية الأنابيب والمقابس).
- 3- قوالب الكبس الساخن.
- 4- ملفات التسخين.
- 5- مكونات المحركات النفاثة التوربينية. (أبواق الصواريخ).

11-15 اكتساب المتانة بالتحويلات الطورية Transformation Toughening

هي إحدى التقنيات المثيرة والواعدة هي التي تستخدم التحويلات الطورية لكبح أو عرقلة نمو التشققات. حيث يتم استخدام دقائق صغيرة جداً من الزركونيا المستقرة جزئياً ونشرها خلال الطور الأساس، غالباً ما يكون أكسيد الألمنيوم (ألومينا) (Al_2O_3) أو زركونيا نفسها (ZrO_2). لقد تم استخدام المواد السيراميكية التالية (CeO , Y_2O_3 , MgO , CaO) عادة كمثبتات (Stabilizer). ان الاستقرار الجزئي سيسمح بالاحتفاظ بالطور رباعي الزوايا (Tetragonal Phase) الشبه المستقر عند الظروف البيئية بدلاً من الطور أحادي الميل (Monoclinic Phase)؛ وهذين الطورين موضحين في مخطط الأطوار $ZrO_2-ZrCaO_3$ ، شكل (7-15). حيث ستؤدي مجالات الإجهادات في مقدمة الشق النامي إلى تحويل الدقائق ذات الطور رباعي الزوايا الشبه مستقر إلى طور أحادي الميل المستقر. سيصاحب هذا التحول الطوري زيادة طفيفة في حجم هذه الدقائق وسينتج عنها إجهادات انضغاطية على سطوح الشقوق وقرب مقدمة رؤوسها وسيعمل ذلك على إيقافها، عن طريق عرقلة نموها. أن هذه العملية ممثلة بالرسم التخطيطي المبين في الشكل (7-15-8).



شكل (7-15) مخطط الأطوار لـ ($ZrO_2-ZrCaO_3$)



شكل (8-15) مخطط يوضح اكتساب المتانة بالتحولات الطورية. (أ) نشوء الشق سيحرض على التحولات الطورية لذقائق الزركونيا، (ب) أيقاف نمو الشق نتيجة لحدوث التحولات الطورية.

12-15 المواد المركبة السيراميكية المقواة بالشعيرات

تعتبر هذه إحدى الطرائق المتطورة الحديثة والتي تستعمل لزيادة متانة المواد السيراميكية باستخدام الشعيرات (Whiskers) السيراميكية ، وغالباً ما تصنع هذه الشعيرات من كربيد السليكون (SiC) أو نتريد السليكون (Si_3N_4). أن هذه الشعيرات ستعمل على عرقلة نمو التشققات عن طريق:

- (1) عملها على انحراف رؤوس الشقوق؛
 - (2) تكوين جسوراً عبر وجوه التشققات؛
 - (3) أمتصاص الطاقة خلال عملية سحب الشعيرات عندما يحدث انفصالها عن الطور الأساس نتيجة تعرضها للشد؛
 - (4) احداث عملية إعادة توزيع للأجهادات في المنطقة المجاورة لرؤوس هذه الشقوق.
- بصورة عامة، سيحسن زيادة المحتوى الحجمي للشعيرات من الصلابة والمتانة؛ وهذا مبيّن في الجدول (1-15) لشعيرات (SiC) المقوية للألومينا (Al_2O_3). علاوة على ذلك نلاحظ ان هنالك أنخفاض كبير في صلابة التصدع للمواد السيراميكية الغير مقواة بالمقارنة مع المواد السيراميكية المقواة.

الجدول (1-15) صلابة التصدع ومتانة التصدع لمحتويات مختلفة من شعيرات كربيد السليكون المقوية للألومينا كطور اساسي.

متانة التصدع (MPa√m)	صلابة التصدع (MPa)	محتوى الشعيرات (vol%)
4.5	-	0
7.1	55 ± 455	10
9.0-7.5	135 ± 655	20
6.0	130 ± 850	40

بالإضافة الى ذلك فإن المواد المركبة السيراميكية ستظهر تحسناً في مقاومة الزحف عند درجات الحرارة العالية ومقاومة للصدمات الحرارية (ال فشل الذي يحدث عند تغير درجة الحرارة بصورة فجائية).

يمكن تصنيع المواد السيراميكية المقواة بالشعيرات باستخدام تقنيات الكبس الساخن، الكبس الأيزوستاتيكي الساخن، والتلبيد بالطور السائل. بالنسبة للتطبيقات فإن الألومينا المقواة بشعيرات (SiC) تستخدم كلقم لعدد القطع المستخدمة في تشغيل السبائك المعدنية الصلدة؛ أن عمر العدة المصنوعة من هذه المواد سيكون أكبر من عمر الكريبيدات المُسننة.

أسئلة الفصل

- (1) ما هي أهم الخواص الشائعة للمواد المركبة السيراميكية؟
- (2) كيف يتم صناعة المواد المركبة السيراميكية التي أساسها كربيد السليكون؟ وما هي أهم تطبيقاتها؟
- (3) كيف يتم تصنيع المواد المركبة السيراميكية بطريقة الترشيح البخاري؟
- (4) العمليات التالية هي طرائق لتصنيع المواد المركبة السيراميكية بطريقة الترشيح بالطور السائل، أشرحها بإيجاز:
 - أ- ترشيح السيراميك المنصهر
 - ب- الترشيح الملاطي
 - ج- الترشيح بالمنصهر المفاعل
 - د- الترشيح والتحلل الحراري للبوليمر
- (5) كيف يتم تصنيع مكونات المواد المركبة السيراميكية بطريقة الأكسدة المباشرة؟
- (6) تصنيع مكونات المواد المركبة السيراميكية بطريقة الصل (المحلل الغراواني)-الهلام؟
- (7) ماذا يقصد بالمواد المركبة كربون-كربون؟ وما هي أهم التطبيقات المستخدمة لهذه المادة؟
- (8) كيف يتم تصنيع المواد المركبة كربون-كربون بطريقة الترشيح بالطور السائل؟
- (9) ما هي خواص المواد المركبة كربون-كربون؟
- (10) كيف يتم اكتساب المتانة للمواد المركبة السيراميكية بالتحويلات الطورية؟
- (11) كيف يتم تقوية المواد المركبة السيراميكية بالشعيرات؟ وما هي آلية عملها؟

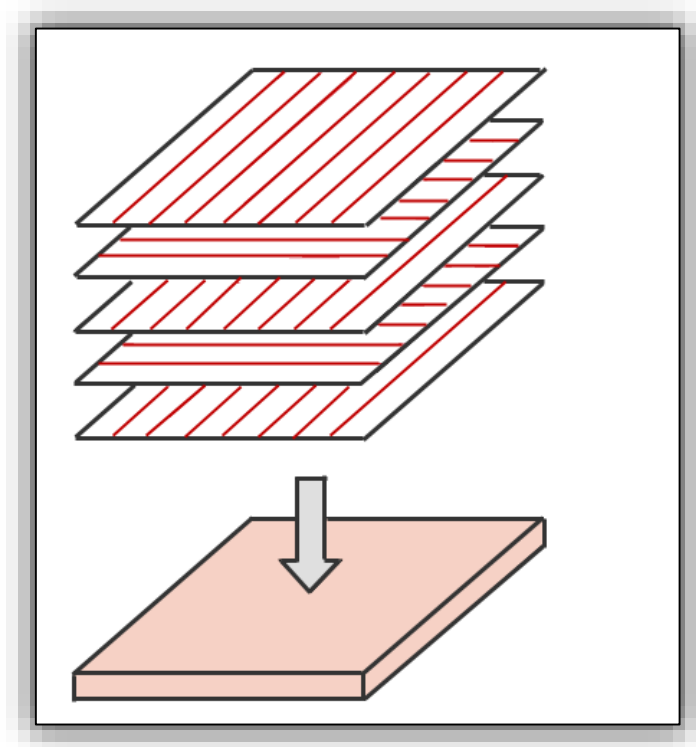
الفصل السادس عشر: المواد المركبة الهيكلية Structural Composite

1-16 مقدمة

المواد المركبة الهيكلية هي عادة ما تتألف من المواد المتجانسة والمركبة، وخواصها سوف لن تعتمد على فقط خواص المواد المتراكبة بل كذلك على التصميم الهندسي للعناصر الإنشائية المختلفة. أن المواد المركبة الطبقيّة (Laminar Composites) وألواح الساندويتش (Sandwich Panel) هما الأكثر شيوعاً في هذا الصنف من المواد المركبة.

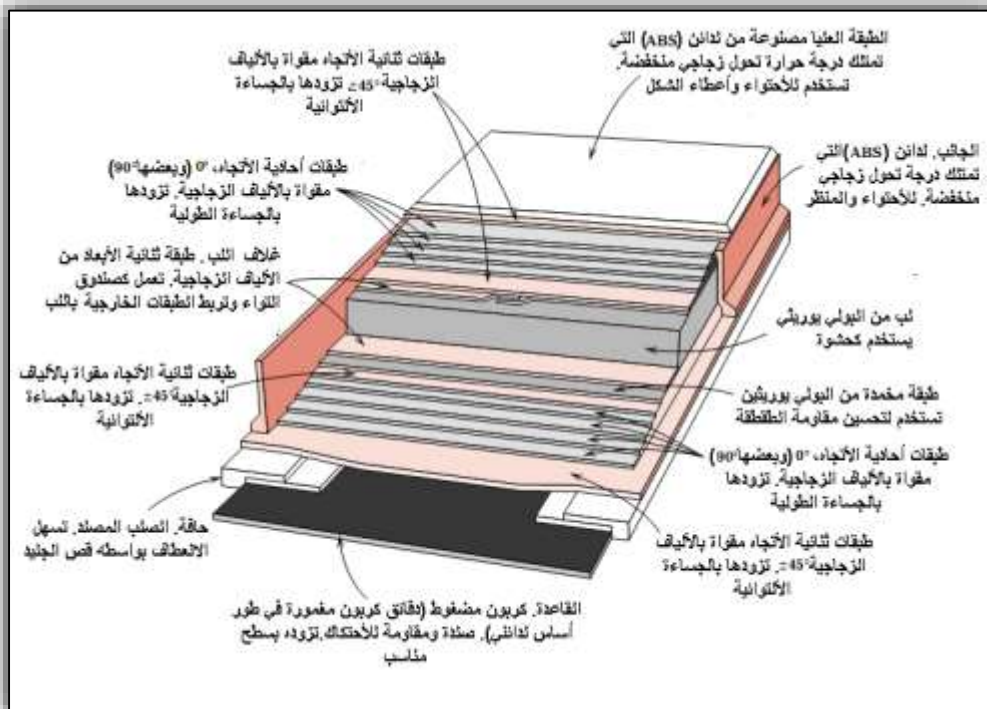
2-16 المواد المركبة الطبقيّة Laminar Composites

تتألف المواد المركبة الطبقيّة من طبقات أو ألواح ثنائية الأبعاد وتمتلك اتجاهات مفضلة للصلابة العالية كالموجودة في الأخشاب واللدائن المقواة بالألياف الطويلة (المستمرة) المصطفة باستقامة واحدة. ان تجميع الطبقات فوق بعضها البعض وتثبيتها بقوة سويةً بحيث أن اتجاه الصلابة العالية سيتغير مع كل طبقة متعاقبة كما مبين في الشكل (1-16).



شكل (1-16) تكديس الطبقات الموجهة لمادة مركبة طبقية مقواة بالألياف.

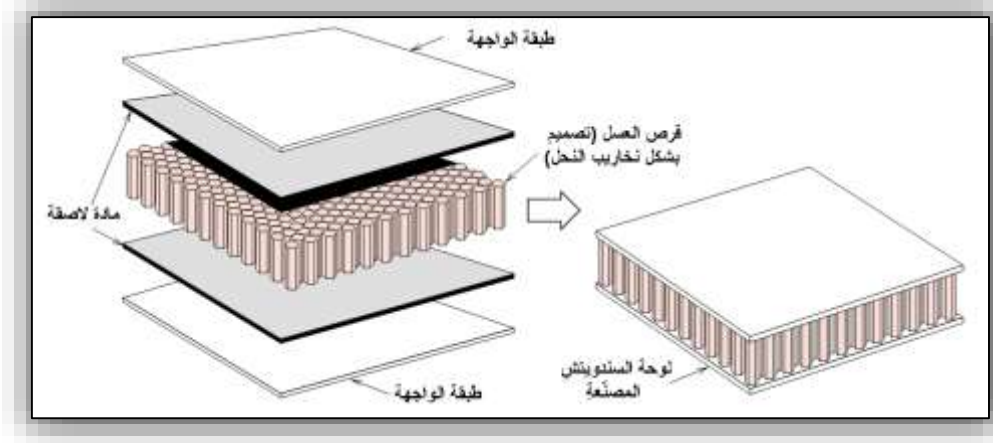
فعلى سبيل المثال ، طبقات الخشب المتجاورة في الخشب المعاكس (Plywood) ستكون مصطفة مع اتجاهات الحبيبات بزواوية متعامدة مع بعضها البعض. أن المواد المركبة الطباقية يمكن ان تتكون باستخدام مواد كالكطن، الورق، أو الألياف الزجاجية المنسوجة بعد غمرها في طور أساسي لدائني. لذلك فان المواد المركبة الطباقية ستمتلك صلابة عالية نسبياً في اتجاهات متعددة في مستوي ثنائي الأبعاد؛ ولكن الصلابة في أي اتجاه ستكون طبعاً أقل مما لو كانت جميع الألياف موجهة بنفس الاتجاه. أن أحد الأمثلة على البنية الطباقية المعقدة نسبياً هي الزجاج الحديثة، شكل(16-2).



شكل(16-2) مقطع عرضي للزجاج الحديثة المتكونة من مواد مركبة طباقية.

3-16 الألواح الساندويتشية Sandwich Panel

تعتبر الألواح الساندويتشية كصنف من المواد المركبة الهيكلية التي تحتوي على طبقتين خارجيتين صلبتين، أو أوجه، مفصولتين عن بعضهما البعض بطبقة من مادة أقل كثافة، أو لب، والذي سيكون مصنوع من مادة أقل جساءة وأقل صلابة. أن مادة الطبقات الخارجية ستتحمل معظم الحمل المستوي بالإضافة إلى إجهادات الحناية المحاذية. أن المواد التي تستخدم كأوجه تتضمن سبائك الألمنيوم، المواد اللدائنية المقواة بالألياف، التيتانيوم، الصلب الكربوني والخشب المعاكس.

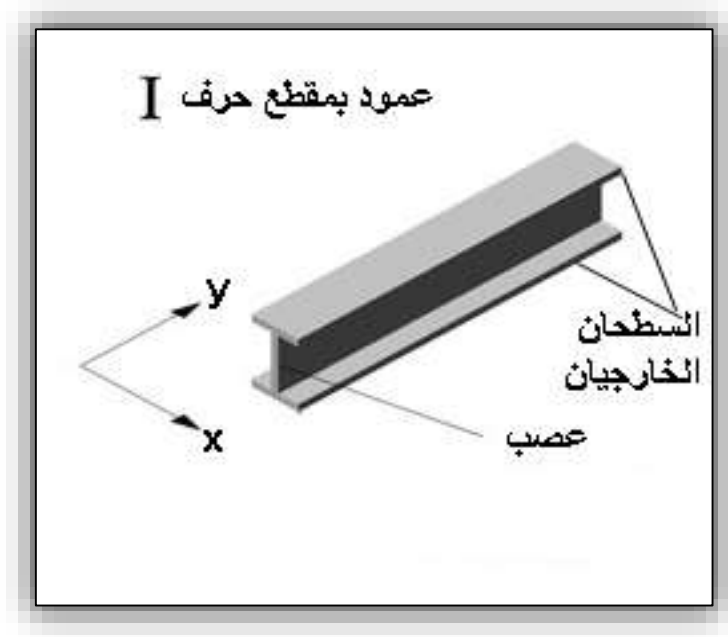


شكل (16-3) مقطع جانبي لللب من نوع قرص العسل في ألواح ساندويتشية.

لللب وظيفتان هيكليتان: الأولى الفصل بين الأوجه ومقاومة التشوهات العمودية على سطح الألواح الخارجية. الثانية: انه يزودها بدرجة من مقاومة لإجهاد القص على طول المستويات العمودية على الأوجه. هنالك مواداً عديدة تستخدم في صناعة اللب والهيكل وتتضمن اللدائن الرغوية (البولي يوريثين)، المطاط الصناعي، الأسمنت الغير عضوي بالإضافة الى خشب البلزا (Balsa Wood). هنالك نوع آخر مشهور من أنواع اللب يتألف من بنية تشبه نخاريب النحل (قرص العسل) (Honey Comb) وتكون عبارة عن رقائق يتم تشكيلها بشكل خلايا سداسية متشابكة، تكون محاورها عمودية على مستويات الواجهة. المادة التي تصنع منها هذا النوع من اللب ربما تكون مادة مشابهة للمادة التي تصنع منها الألواح الوجيهة. الشكل (16-3) يبين مقطع جانبي لللب من نوع قرص العسل في ألواح ساندويتشية. أن الألواح الساندويتشية قد وجدت تطبيقات واسعة لها في السقوف، الأرضيات، جدران الأبنية، في الطائرات كالأجنحة وذيل الطائرة وهيكلها.

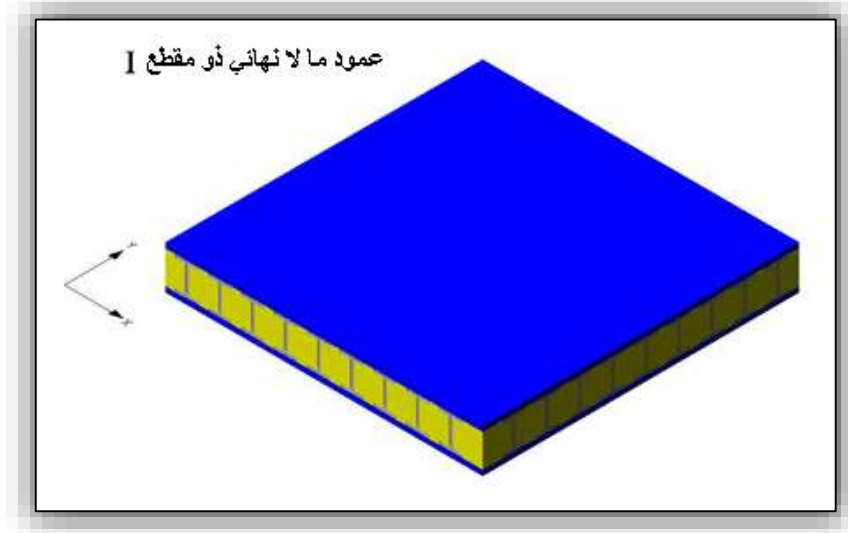
16-3-1 كيف تعمل الألواح الساندويتشية المركبة

الوصف هنا سيكون مبسط لمعرفة الكيفية التي تعمل بها هذا النوع من المواد المركبة الهيكلية. أولاً، لننظر الى العمود ذو مقطع حرف I ، شكل (16-4) حيث نلاحظ ان السطحين الخارجيين قد ارتبطا بعصب ليكونا جزء هيكلي. عندما يتعرض العمود لإجهاد الحناية فان السطحين الخارجيين سيكون أحدهما في حالة شد والآخر في حالة انضغاط، هنا سيتولد الجزء الأعظم من الإجهادات. على أية حال، العمود ذو المقطع I سيكون الأكثر تأثراً في الانحناء في المستوي المعرف بالاتجاهين Y-Z.



شكل (4-16) عمود ذو مقطع بشكل حرف I

أن الألواح الساندويتشية هي ممتثلة للعمود ذو المقطع حرف I، إلا إنها تتألف من سطوح وعصب ممتد في جميع الاتجاهات، شكل (5-16). حيث أن السطوح الخارجية ستكون ممتثلة للسطوح الخارجية للعمود ذو المقطع I وللب الساندويتش سيكون كالعصب الذي يربط بين السطحين



شكل (5-16) لوح ساندويتشي مركب.

الخارجيين في العمود ذو المقطع I. ولكونها ألواحاً فإنها ستتعرض الى إجهادات حناية في جميع المستويات، وليس فقط في المستوي y-z (كما في العمود ذو المقطع I الذي أشرنا إليه أعلاه) بل كذلك في المستوي x-z، وأي مستوي بينهما.

عندما تتعرض الألواح الساندويتشية الى الانحناء، فإن إحدى طبقاتها الخارجية ستتعرض الى الشد والأخرى ستتعرض الى الانضغاط. هنا حيث يحدث الإجهادات العظمى في البنية الساندويتشية. أما وظيفة اللب فهي لمسك الطبقتين سوية، بحيث لا يحدث انبعاج، انتزاع، تشوه، أو كسر في الهيكل. فاللب يحافظ على ثبات الطبقات الخارجية وعلى المسافة بينهما.

الإجهاد الرئيسي الذي يتعرض له اللب هو إجهاد القص، عندما تحاول الطبقتين العليا والسفلى الانزلاق فوق بعضهما البعض. أن جساءة اللب تُحدد بالمادة التي يُصنع منها اللب (خصائص القص). أن جساءة الألواح الساندويتشية ستحددها بصورة رئيسية خواص مواد اللب وسمك طبقة اللب.

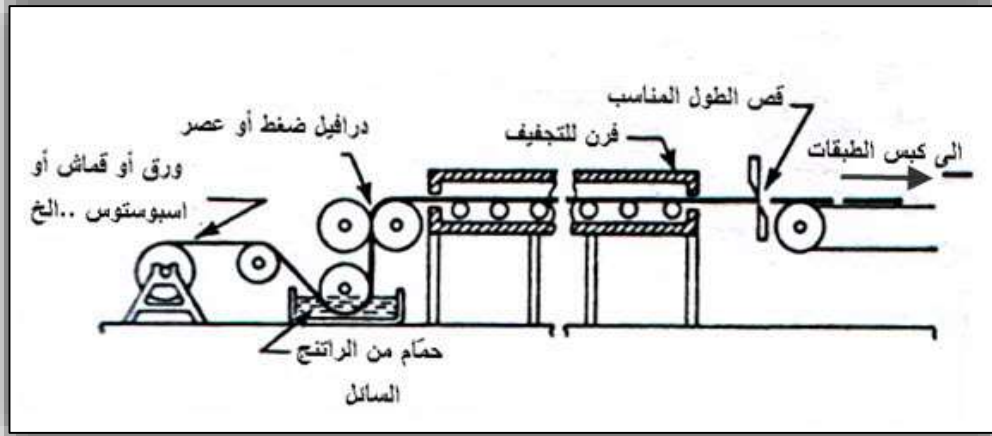
4-16 عمليات تصنيع اللدائن الطبقي

(Processes for Laminated Plastics)

يتألف اللدائن الطبقي من صفائح من الورق، الأسبستوس، الخشب، أو مواد شبيهه، والتي يتم غمسها أو طلائها بالراتنج ومن ثم تُركب تحت تأثير الحرارة والضغط إلى الشكل التجاري للمواد. ان هذه المواد تكون صلبة و قوية ومقاومة للصدمات ولا تتأثر بالحرارة أو الماء ولها خواصاً مرغوباً فيها في العديد من التطبيقات الكهربائية. يمكن أن يتألف المنتج النهائي من إما عدد قليل من الطبقات أو أكثر من مئة طبقة، اعتماداً على السُمك والخواص المطلوبين. على الرغم من أن معظم منتجات اللدائن الطبقي هي بشكل صفائح إلا أن هنالك أشكالاً أخرى كالقضبان والأنابيب بأشكال خاصة يمكن ان تنتج بهذه الطريقة كذلك. ان المواد المُصنعة بهذه الطريقة لها خصائص جيدة للتشغيل مما يسمح في تصنيع بعض المنتجات منها كالتروس، القوابض الاحتكاكية، كراسي التحميل والأثاث.

في عملية تصنيع المنتج الطبقي، يتم إذابة المادة الراتنجية في مذيب لتحويلها إلى سائل وارنيش (طلاء راتنجي صقيل). تغمس بكرات الورق أو النسيج بحمام الراتنج السائل كما مبين في الشكل (16-6). ثم يُقَطَّع في المراحل النهائية إلى الحجم المناسب ويخزن سوية بعدد كافٍ لصنع السمك المناسب للصفحة.

يمكن صنع الأنابيب بواسطة مكينات اللف الشريطي باستخدام المخزون الصفائحي المحضر ولفه حول قلب من الصلب ومن ثم إنضاجه بوضعه في فرن وتعريره

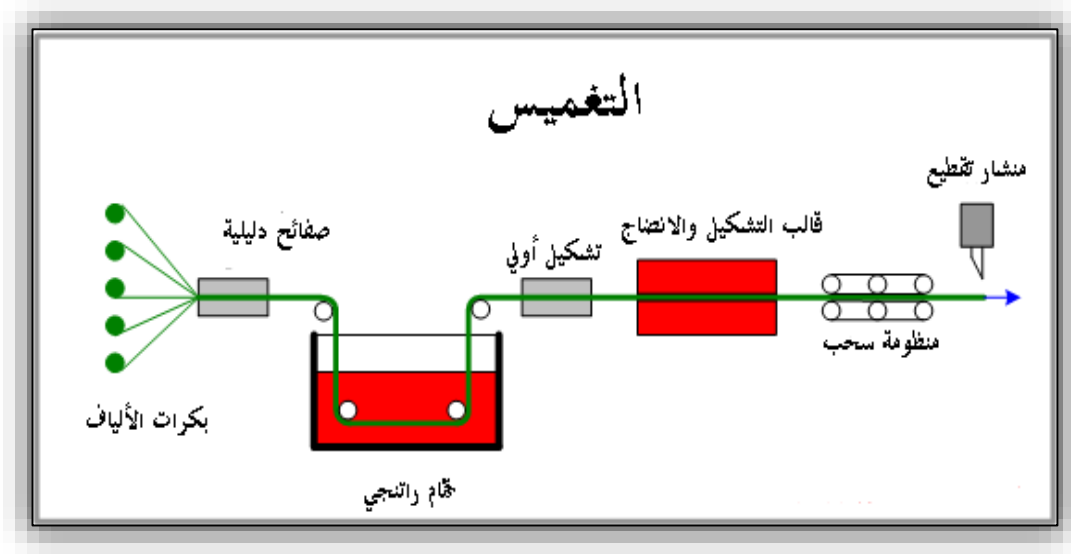


شكل(16-6) مخطط لعملية تحضير مواد صفائحية لإنتاج اللدائن الطبقي.

للحرارة والضغط في قالب الأنبوب. اللدائن الطبقي الذي أساسه الورق يستخدم في المنتجات الكهربائية. أما اللدائن الطبقي الذي أساسه النسيج، والذي يكون أكثر قوة ومتانة فيستخدم للأجزاء التي تتعرض للإجهادات. التروس التي تُصنع من اللدائن الطبقي الذي أساسه الكتان تكون منخفضة الضجيج أثناء العمل. الألياف الزجاجية يوصى بها في حالات التي تتطلب مقاومة للحرارة وانخفاض امتصاصية الماء. يتم إنتاج صفائح الخشب الطبقي للحصول على مادة خفيفة وصلابتها مكافئة لبعض المعادن وتقاوم الرطوبة. الزجاج الواقي (الذي يستخدم في السيارات)، هو في الحقيقة منتج لدائني طبقي، حيث أن طبقات من الثرموبلاستيك تستخدم لوضعها بين صفائح الزجاج لمنع التشطي (Nonshattering). الراتنجات الأربعة الشائعة الاستخدام هي الفينولات، السليكونات، والأبيوكسيات، والميلامين (Melamines).

1-4-16 التغميس Pultrusion

تستخدم هذه التقنية لتصنيع المنتجات التي تقوى بأليافاً مستمرة و والتي تكون مساحة مقاطعها ثابتة (كالقضبان، الأنابيب، والأعمدة.... الخ). وهي طريقة مؤتمنة ذات إنتاجية عالية في تصنيع المواد المركبة اللدائنية بشكل ألياف مستمرة لمنتجات ذات مقطع عرضي ثابت. الشكل (16-7) يبين رسم تخطيطي لهذه الطريقة.



الشكل (16-7) طريقة التغميس لصناعة المواد المركبة اللدائنية.

تتضمن طريقة التغميس الخطوات التالية:

- 1- يتم سحب الألياف المقوية من البكرات. الألياف المسحوبة يمكن أن تمر بدرفيل لعملها كحصيرة أو لنسجها، يتم التحكم بعملية السحب هذه عن طريق منظومة السحب.
 - 2- تقوم الصفائح الدليلية بتجميع الألياف بشكل حزمة وتوجيهها نحو الحمام الراتنجي.
 - 3- تدخل الألياف الحمام الراتنجي حيث يتم ترطيبها وتغميسها بالراتنج السائل. السائل الراتنجي يحتوي على لدائن من نوع الثرموستنك، صبغات، حشوات، محفزات، ومواد أخرى إضافية.
 - 4- تخرج الألياف الرطبة من الحمام وتدخل التشكيل الأولي حيث يتم عصر الراتنج الزائد إلى خارج الألياف وتشكيل المادة بالشكل المطلوب.
 - 5- يتم تحرير الألياف المشكلة من خلال قالب التسخين حيث يتم الحصول على الأبعاد والمقاطع العرضية المطلوبة ويتم إنضاج الراتنج.
 - 6- المنتج الناضج يتم تقطيعه إلى المقاسات المناسبة باستخدام مناشير القطع.
- تتميز طريقة التشكيل بالتغميس بالخصائص التالية:

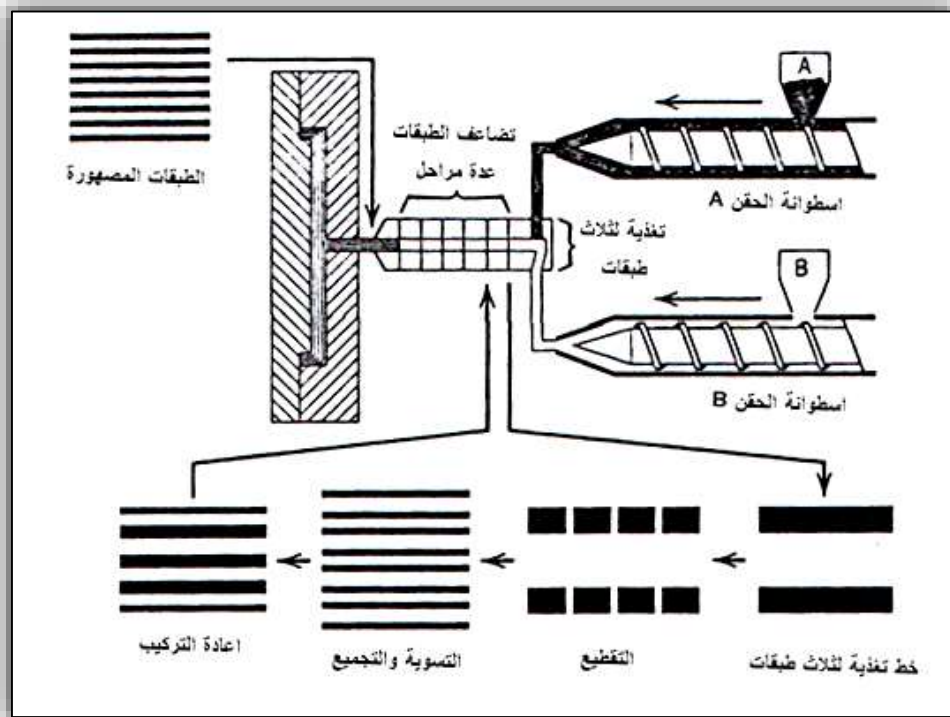
- 1- الإنتاجية العالية.
- 2- يمكن التحكم بمتغيرات العملية بسهولة.
- 3- انخفاض عدد العمالة المطلوبة.
- 4- دقة أبعاد المنتجات (المساحة المقطعية).
- 5- الإنهاء السطحي الجيد (التشطيب).

6- التجانس في توزيع الألياف بدرجة تركيز عالية (التركيز قد يصل لغاية 80%).
تستخدم هذه الطريقة لصناعة المواد المركبة اللدائية المقواة بالألياف الزجاجية، ألياف الكربون وألياف كيفلر.

2-4-16 القولبة الطبقيّة بالحقن (Lamellar Injection Molding)

ان الغرض من تقنية القولبة الطبقيّة بالحقن هي الحصول على طبقات دقيقة (Microlayer) (صغيرة) التي تنتج أجزاء مقولبة من راتنجات متعددة بشكل طبقات دقيقة ومعقدة.

ان البنية الطبقيّة الناتجة هنا ستختلف عن البنيات المنتجة بالطرائق التقليدية المستخدمة لهذا الغرض كالمخلط والتسبيك بالتشتيت (Alloy/blend Dispersion). ويمكن بواسطة هذه العملية تركيب أنواع مختلفة من اللدائن طالما تكون لزوجتها ضمن العامل ثلاثة ودرجات انصهارها متقاربة. ان هذا سيمكننا من صنع بنية طبقيّة ذات خصائص فيزيائية مُحسنة. فعلى سبيل المثال الطبقات الدقيقة من البولي كربونيت/بولي بيوتيلين تيرافثاليت (Polycarbonate/Polybutylene Terephthalate) المنتجة بطريقة القولبة الطبقيّة بالحقن تمتلك مقاومة للتشوه الحراري تفوق بمقدار (10 – 4.5 °C) على مقاومة المنتجات المصنعة



شكل (8-16) مخطط القولبة الطبقيّة بالحقن.

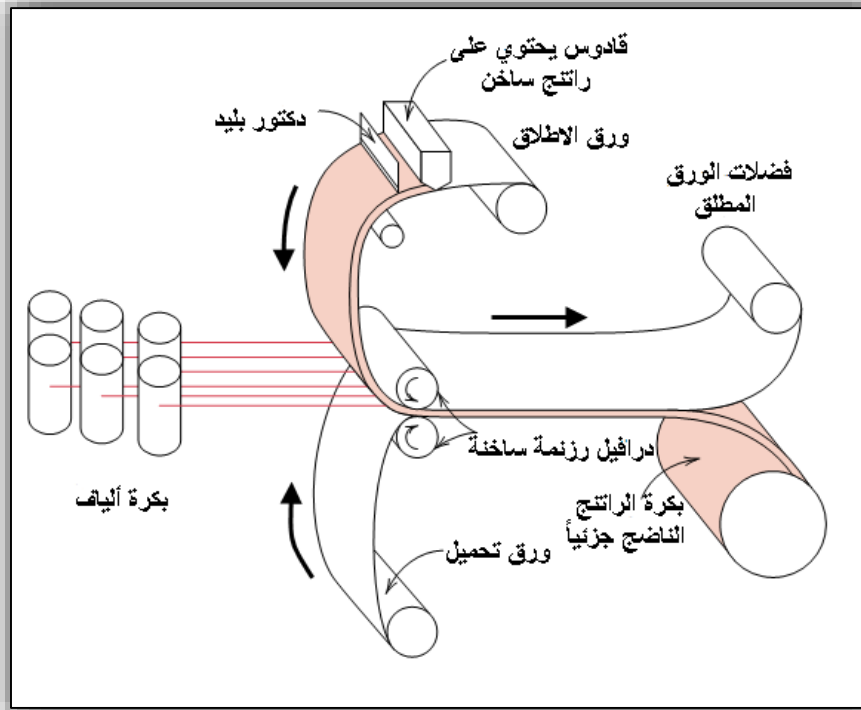
بالطرائق الأخرى، نتيجة للتلاصق القوي بين الطبقات الذي تزودها لها هذه التقنية. كذلك سيتحسن الاستقرار في الأبعاد والوضوح البصري (Optical Clarity) ومقاومة التشقق الإجهادي البيئي (Environmental Stress Crack Resistance). الشكل (16-8)، يوضح مخطط يبين تقنية القولية الطبقة بالحقن باستخدام مجموعة التغذية والطبقات المتعددة لتركب مع المجرى المنصهر من آلي حقن الى شكل بنية طبقية دقيقة. بصورة عامة، تستخدم عملية القولية مجموعة التغذية التي توحد التدفقات الأصلية من آلي الحقن بتدفق تغذية ثلاثي الطبقات. ويمكن الحصول على تدفق تغذية خماسي الطبقات إذا أضفنا مادة ثالثة، مثلاً إضافة طبقة لمادة لاصقة للراتنجات الغير المتوافقة (التي لا تلتصق ببعضها البعض). حيث يتدفق المنصهر من مجموعة التغذية، الذي يقاس حجمه بدقة، خلال الطبقات المتعددة. وخلال الطبقات المتعددة، هنالك مجموعة من القنوات ذات التقسيم المتكرر من اجل تغذية المجرى ومن ثم تركيبها جميعاً إلى مجرى طبقي جديد لمجموعة كبيرة من الطبقات لكنها بسمك أقل.

3-4-16 طريقة الإنتاج بالتشريب المسبق براتنج لدائني

Prepreg Production Processes

أن مصطلح الـ(Prepreg) هو مصطلح يستخدم في صناعة المواد المركبة. حيث يطلق على صناعة المواد المركبة المقواة بالألياف المستمرة المشربة مسبقاً براتنج لدائني يكون ناضج جزئياً. حيث تزود هذه المواد الى المصنع بشكل شرائط، والتي يتم قولبتها مباشرةً وإنضاجها تماماً دون الحاجة الى إضافة أي راتنج إضافي. أنها ربما تعتبر كشكل من أشكال المواد المركبة التي تستخدم بشكل واسع في التطبيقات الإنشائية.

ان طريقة التشريب المسبق ممثلة بالرسم التخطيطي والتي تستخدم للدائن الثرموستك في الشكل (16-9)، والتي تبدأ بمؤازرة سلسلة من الألياف الطليقة (غير المنسوجة) والملفوفة حول بكرات. يتم سحبها بعد ذلك وعملها كساندويتش ثم تُكبس بين صحيفتي الإطلاق والحاملة الورقية باستخدام درافيل مُسخّنة، بعملية يطلق عليها الرزمنة. يتم طلاء صفائح الإطلاق الورقية بغشاء رقيق (Film) من محلول راتنجي ساخن ذو لزوجة منخفضة نسبياً بحيث تزودنا بالمادة الراتنجية التي ستتشرب بها الألياف.



شكل (16-9) رسم تخطيطي يوضح إنتاج الأشرطة المشربة مسبقاً باستخدام لدائن الترموستك.

وتستخدم شفرات يطلق عليها شفرات ضبط الطلاء الراتنجي (Doctor Blade) لنشر الراتنج بشكل غشاء منتظم السمك والعرض. ان المنتج المشرب النهائي سيكون عبارة عن شريط رقيق يحتوي على أليافاً مستمرة ومصطفة باستقامة وتكون مغمورة في راتنج ناضج جزئياً - يتم تحضيره للرزم باللف حول قلب كارتوني. كما مبين في الشكل (16-9)، فان صفائح ورق الإطلاق سيتم إزالتها عند لف الشريط المشرب. ان السمك الشائع لهذه الأشرطة غالباً ما يكون ما بين 0.08 الى 0.25 mm، وعرضه ما بين (25- 1525 mm)، بينما المحتوى الراتنجي يكون ما بين (35-45 vol%). عند درجة حرارة الغرفة سيبدأ الطور الأساسي الراتنجي (من نوع الترموستك) بعملية الإنضاج؛ لذا يتم تخزين المنتج الناضج جزئياً عند درجة حرارة (0 °C) أو أدنى من ذلك. كذلك يجب تقليل الزمن المستخدم والذي يتعرض فيه المنتج الى درجة حرارة الغرفة. اذا تم التعامل مع المنتج الناضج جزئياً بدقة فإن عمر المنتج سيكون على الأقل 6 أشهر أو عادةً أكثر بكثير من ذلك.

يمكن الاستفادة من كلا النوعين لللدائن (الترموستك و الترموبلاستيك) في عمليات الإنتاج؛ الألياف الكربونية والزجاجية والأراميد هي الشائعة الاستخدام في التقوية. ان التصنيع الحقيقي يبدأ بوضع الشريط الناضج جزئياً على سطح التشكيل. عادة ما تُكدس عدد من الطبقات فوق بعضها البعض (بعد إزالتها من حامل إسناد الورقة) لتزويدها بالسمك المطلوب. ان ترتيب هذه الطبقات يمكن ان يكون أحادي الاتجاهات، لكن الأكثر شيوعاً هو أن تغيير

اتجاهات الألياف للحصول على مواد مركبة طبقية ذات ألياف مختلفة الاتجاهات. لانجاز الإنضاج الكلي يتم استخدام الحرارة والضغط.

ان طريقة وضع الطبقات يمكن ان تتجزء بالكامل يدوياً (التكديس اليدوي)، حيث يقوم المُشغِل بقص الأطوال المناسبة للأشرطة ووضعها في الاتجاه المطلوب على سطح التشكيل. وكبديل عن ذلك، نماذج الأشرطة ربما تقطع بالآلات ثم ترتب يدوياً. يمكن تخفيض تكاليف التصنيع بالأتمتة لترتيب الأشرطة الناضجة جزئياً وباستخدام طرائق تصنيع (الف الخيطي) والتي عملياً ستستغني عن الحاجة للأيدي العاملة. أن هذه الطرائق المؤتمتة هي أساسية للعديد من استخدامات المواد المركبة لكي تكون مؤثرة على الكلفة (خفض الكلفة).

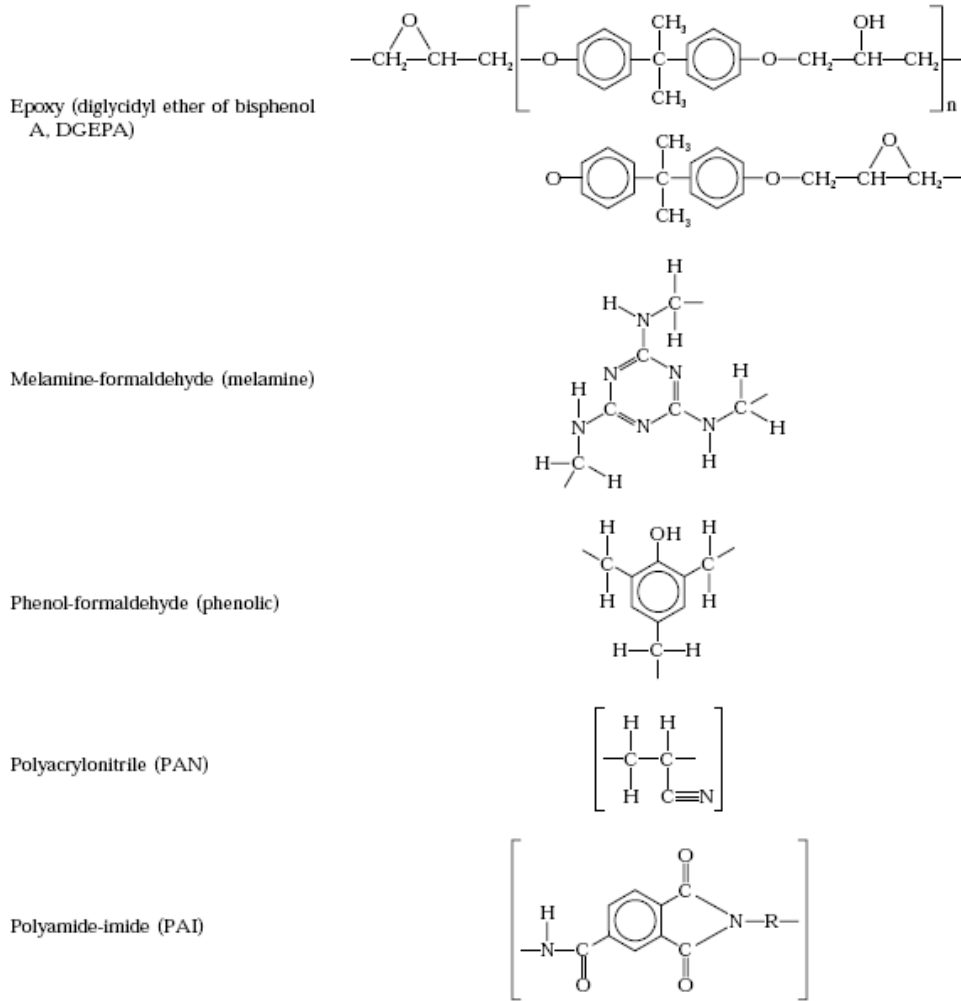
أسئلة الفصل

1. ما هي المواد المركبة الهيكلية ومن أي شيء تتألف؟
2. على ماذا تعتمد خواص المواد المركبة الهيكلية؟
3. ما هي المواد المركبة الطبقية؟ وما هو السبب الرئيسي لتصنيع مثل هذه المواد؟
4. ما هي الألواح الساندويتشية؟
5. ما هي الغاية من تصنيع المواد المركبة الهيكلية؟
6. ما هي وظيفة كل من اللب والأوجه؟
7. ما هي آلية عمل الألواح الساندويتشية المركبة؟
8. ما هي الأشكال التي يمكن صنعها باللدائن الطبقية؟
9. أشرح باختصار موضحاً تقنيات تصنيع المواد المركبة الطبقية التالية:
 - أ- التغميس
 - ب- طريقة التشريب المسبق براتنج لدائني
 - ج- القولية الطبقية بالحقن
10. ما هي مميزات تقنية القولية بالحقن بالمقارنة مع التقنيات الأخرى؟

الملاحق

الاسم الكيميائي

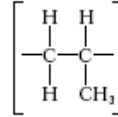
البنية الكيميائية للمير



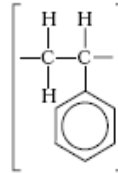
الاسم الكيميائي

البنية الكيميائية للمير

Polypropylene (PP)



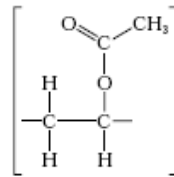
Polystyrene (PS)



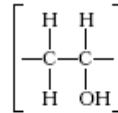
Polytetrafluoroethylene (PTFE)



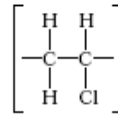
Polyvinyl acetate (PVAc)



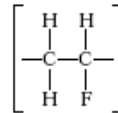
Polyvinyl alcohol (PVA)



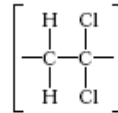
Polyvinyl chloride (PVC)



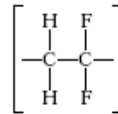
Polyvinyl fluoride (PVF)



Polyvinylidene chloride (PVDC)



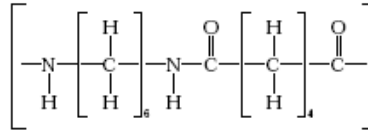
Polyvinylidene fluoride (PVDF)



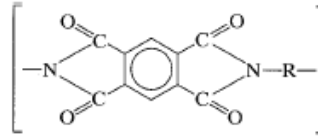
الاسم الكيميائي

البنية الكيميائية للمير

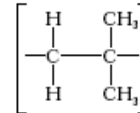
Polyhexamethylene adipamide
(nylon 6,6)



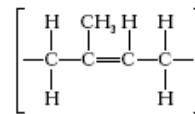
Polyimide



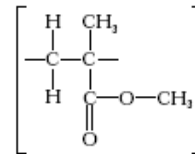
Polyisobutylene



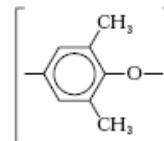
cis-Polyisoprene (natural rubber)



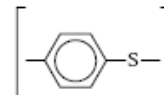
Polymethyl methacrylate (PMMA)



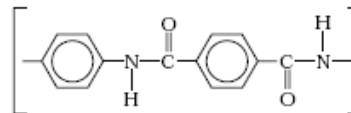
Polyphenylene oxide (PPO)



Polyphenylene sulfide (PPS)



Polyparaphenylene terephthalamide
(aramid)



ملحق (1ب) درجات حرارة التحول الزجاجي والانصهار لللدائن

البوليمر	درجة حرارة التحول الزجاجي °C (°F)	درجة حرارة الانصهار °C (°F)
Aramid	375 (705)	~640 (~1185)
Polyimide (thermoplastic)	280-330 (535-625)	<i>a</i>
Polyamide-imide	277-289 (530-550)	<i>a</i>
Polycarbonate	150 (300)	265 (510)
Polyetheretherketone	143 (290)	334 (635)
Polyacrylonitrile	104 (220)	317 (600)
Polystyrene		
• Atactic	100 (212)	<i>a</i>
• Isotactic	100 (212)	240 (465)
Polybutylene terephthalate	—	220-267 (428-513)
Polyvinyl chloride	87 (190)	212 (415)
Polyphenylene sulfide	85 (185)	285 (545)
Polyethylene terephthalate	69 (155)	265 (510)
Nylon 6,6	57 (135)	265 (509)
Polymethyl methacrylate		
• Syndiotactic	3 (35)	105 (220)
• Isotactic	3 (35)	45 (115)
Polypropylene		
• Isotactic	-10 (15)	175 (347)
• Atactic	-18 (0)	175 (347)
Polyvinylidene chloride	-17 (1)	198 (390)
• Atactic	-18 (0)	175 (347)
Polyvinyl fluoride	-20 (-5)	200 (390)
Polyvinylidene fluoride	-35 (-30)	—
Polychloroprene (chloroprene rubber or neoprene)	-50 (-60)	80 (175)
Polyisobutylene	-70 (-95)	128 (260)
<i>cis</i> -Polyisoprene	-73 (-100)	28 (80)
Polybutadiene		
• Syndiotactic	-90 (-130)	154 (310)
• Isotactic	-90 (-130)	120 (250)
High density polyethylene	-90 (-130)	137 (279)
Polytetrafluoroethylene	-97 (-140)	327 (620)
Low density polyethylene	-110 (-165)	115 (240)
Polydimethylsiloxane (silicone rubber)	-123 (-190)	-54 (-65)

^a These polymers normally exist at least 95% noncrystalline.

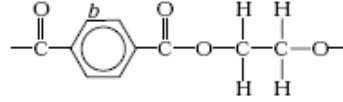
تكملة للملحق (ج1)

البوليمير

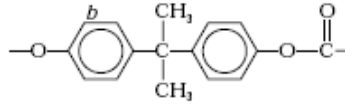
البنية المتكررة (المير)



Polyethylene terephthalate (PET, a polyester)



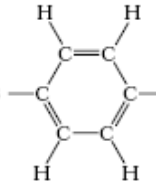
Polycarbonate










^a The



symbol in the backbone chain denotes an aromatic ring as



ملحق (د1) الوحدات المتكررة للبوليمرات المشتركة للمطاط

اسم الوحدة المتكررة	وحدة البنية المتكررة	اسم الوحدة المتكررة	وحدة البنية المتكررة
 Acrylonitrile	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}\equiv\text{N} \end{array}$	 <i>cis</i> -Isoprene	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ -\text{C} = \text{C} = \text{C} - \text{C}- \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$
 Styrene	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	 Isobutylene	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$
 Butadiene	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ -\text{C} = \text{C} = \text{C} - \text{C}- \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$	 Dimethylsiloxane	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ -\text{Si}-\text{O}- \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
 Chloroprene	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ -\text{C} = \text{C} = \text{C} - \text{C}- \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$		

ملحق (أ2) صلابة الشد لبعض البوليمرات

الصفحة 1 من 5

Polymer	Tensile Strength (ASTM D638) (10 ³ psi)
Olefin Copolymer: EEA (ethylene ethyl acrylate)	0.2
Olefin Copolymer: Ethylene butene	0.35
Olefin Copolymer: EVA (ethylene vinyl acetate)	0.36
Propylene-ethylene	0.4
Ethylene Ionomer	0.4
Fluorocarbons: Ceramic reinforced (PTFE)	0.75—2.5
Polyethylene, Type I, low density: Melt index 200	0.9—1.1 (ASTM D412)
Polyvinyl Chloride & Copolymer: Nonrigid—general	1—3.5 (ASTM D412)
Polyesters, cast thermoset: Flexible	1—8
6/6 Nylon: General purpose extrusion	1.26, 8.6
Polyethylene, Type I, low density: Melt index 6—26	1.4—2.0 (ASTM D412)
Polyethylene, Type I, low density: Melt index 0.3—3.6	1.4—2.5 (ASTM D412)
Standard Epoxy: Cast flexible	1.4—7.6
Polyethylene, Type II, medium density: Melt index 20	2
Polyvinyl Chloride & Copolymer: Nonrigid—electrical	2—3.2 (ASTM D412)
Polyethylene, Type II, medium density: Melt index 1.0—1.9	2.3—2.4
Fluorocarbons: Fluorinated ethylene propylene (FEP)	2.5—4.0
Fluorocarbons: Polytetrafluoroethylene (PTFE)	2.5—6.5
Polyethylene, Type III, higher density: Melt Melt index 0.1—12.0	2.9—4.0
Cellulose Acetate Butyrate, ASTM Grade: S2	3.0—4.0 at Fracture
Cellulose Acetate; ASTM Grade: S2—1	3.0—4.4 at Fracture
Alkyd; Molded: Granular (high speed molding)	3—4
Ethylene Polyallomer	3—4.3
Phenolics: Rubber phenolic—chopped fabric	3—5 (ASTM D651)

ملحق (2) صلابة الشد لبعض البوليمرات
الصفحة 2 من 5

Polymer	Tensile Strength (ASTM D638) (10 ³ psi)
Polystyrene: High impact Cellulose Acetate; ASTM Grade: MS—1, MS—2 Cellulose Acetate Propionate, ASTM Grade: 6 Phenolics: Rubber phenolic— asbestos	3.3—5.1 3.9—5.3 at Fracture 4 4 (ASTM D651)
Polystyrene: Medium impact Alkyd; Molded: Putty (encapsulating) ABS Resin; Molded, Extruded: Low temperature impact Reinforced polyester moldings: Heat & chemical resistant (asbestos)	4.0—6.0 4—5 4—6 4—6
Silicone: Granular (silica) reinforced Diallyl Phthalates, Molded: Asbestos filled Polyvinyl Chloride & Copolymer: Vinylidene chloride Polyethylene, Type III, higher density: Melt index 0.2—0.9	4—6 (ASTM D651) 4—6.5 4—8, 15—40 (ASTM D412) 4.4
Polyethylene, Type III, higher density: Melt index 1.5—15 Diallyl Phthalates, Molded: Orlon filled ABS Resin; Molded, Extruded: Very high impact Polypropylene: general purpose	4.4 4.5—6 4.5—6.0 4.5—6.0
Phenolics: Rubber phenolic—woodflour or flock Fluorocarbons: Polytrifluoro chloroethylene (PTFCE) Diallyl Phthalates, Molded: Dacron filled Cellulose Acetate; ASTM Grade: MH—1, MH—2	4.5—9 (ASTM D651) 4.6—5.7 4.6—6.2 4.8—6.3 at Fracture
Polystyrene: General purpose ABS Resin; Molded, Extruded: High impact Cellulose Acetate Butyrate, ASTM Grade: MH Phenolics, General: woodflour and flock filler	5.0—10 5.0—6.0 5.0—6.0 at Fracture 5.0—8.5 (ASTM D651)
To convert psi to MPa, multiply by 145.	
Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, <i>CRC Handbook of Materials Science, Vol. 3</i> , CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and <i>Engineered Materials Handbook, Vol.2, Engineering Plastics</i> , ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.	

ملحق (أ2) صلابة الشد لبعض البوليمرات
الصفحة 3 من 5

Polymer	Tensile Strength (ASTM D638) (10 ³ psi)
Phenolics, Shock: paper, flock, or pulp filler	5.0—8.5 (ASTM D651)
Reinforced polyester moldings: High strength (glass fibers)	5—10
Urea: Alpha, cellulose filled (ASTM Type I)	5—10
Phenolics, Very high shock: glass fiber filler	5—10 (ASTM D651)
Polyesters, cast thermoset: Rigid	5—15
Allyl diglycol carbonate (thermoset)	5—6
Melamine, molded: Alpha cellulose and mineral filler	5—8
Alkyd; Molded: Glass reinforced (heavy duty parts)	5—9
Melamine, molded: Cellulose electrical filler	5—9
Phenolics, High shock: chopped fabric or cord filler	5—9 (ASTM D651)
Cellulose Acetate Propionate, ASTM Grade: 3	5.1—5.9
Epoxy; (cycloaliphatic diepoxides): Molded	5.2—5.3
Fluorocarbons: Polyvinylidene— fluoride (PVDF)	5.2—8.6
Polyethylene, Type III, higher density, high molecular weight	5.4
Diallyl Phthalates, Molded: Glass fiber filled	5.5—11
Polyvinyl Chloride & Copolymer: Rigid—normal impact	5.5—8 (ASTM D412)
Acrylic Moldings: High impact grade	5.5—8.0
Cellulose Acetate; ASTM Grade: H2—1	5.8—7.2 at Fracture
Cellulose Acetate Propionate, ASTM Grade: 1	5.9—6.5
Chlorinated polyether	6
Phenolics: Arc resistant—mineral	6 (ASTM D651)
Acrylic Cast Resin Sheets, Rods: General purpose, type I	6—9
Melamine, molded: Glass fiber filler	6—9
ABS Resin; Molded, Extruded: Medium impact	6.3—8.0
Silicone: Fibrous (glass) reinforced	6.5 (ASTM D651)
Polyacetal homopolymer: 22% TFE reinforced	6.9
Cellulose Acetate Butyrate, ASTM Grade: H4	6.9 at Fracture
ABS Resin; Molded, Extruded: Heat resistant	7.0—8.0

To convert psi to MPa, multiply by 145.

Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, *CRC Handbook of Materials Science*, Vol. 3, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and *Engineered Materials Handbook*, Vol.2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.

ملحق (أ2) صلابة الشد لبعض البوليمرات
الصفحة 4 من 5

Polymer	Tensile Strength (ASTM D638) (10 ³ psi)
Alkyd; Molded: Rope (general purpose)	7—8
Cellulose Acetate; ASTM Grade: H4—1	7—8 at Fracture
Nylon, Type 12	7.1—8.5
6/10 Nylon: General purpose	7.1—8.5
Chlorinated polyvinyl chloride	7.3
Nylon, Type 6: Flexible copolymers	7.5—10.0
Acrylic Cast Resin Sheets, Rods: General purpose, type II	8—10
Standard Epoxy: Molded	8—11
Epoxy, (cycloaliphatic diepoxides): Cast, rigid	8—12
ABS—Polycarbonate Alloy	8.2
Polystyrene: Styrene acrylonitrile (SAN)	8.3—12.0
Polyacetal homopolymer: 20% glass reinforced	8.5
Polyacetal copolymer: Standard	8.8
Polyacetal copolymer: High flow	8.8
Acrylic Moldings: Grades 5, 6, 8	8.8—10.5
Polycarbonate	9.5
Standard Epoxy: Cast rigid	9.5—11.5
Nylon, Type 6: General purpose	9.5—12.5
Epoxy novolacs: Cast, rigid	9.6—12.0
Polyacetal homopolymer: Standard	10
6/6 Nylon: General purpose molding	11.2—11.8
Nylon, Type 6: Cast	12.8
Polyarylsulfone	13
Polystyrene: Glass fiber - 30% reinforced	14
Reinforced polyester: Sheet molding, general purpose	15—17
Polycarbonate (40% glass fiber reinforced)	18
Polystyrene: Glass fiber (30%) reinforced SAN	18
Polyacetal copolymer: 25% glass reinforced	18.5

ملحق (أ2) صلابة الشد لبعض البوليمرات
الصفحة 5 من 5

Polymer	Tensile Strength (ASTM D638) (10 ³ psi)
6/10 Nylon: Glass fiber (30%) reinforced	19
6/6 Nylon: Glass fiber Molybdenum disulfide filled	19—22
Nylon, Type 6: Glass fiber (30%) reinforced	21—24
6/6 Nylon: Glass fiber reinforced	25—30
Silicone: Woven glass fabric / silicone laminate	30—35 (ASTM D651)
Epoxy: Glass cloth laminate	50-58
Epoxy, (cycloaliphatic diepoxides): Glass cloth laminate	50—52
Epoxy novolacs: Glass cloth laminate	59.2
Epoxy: Glass cloth: High strength laminate	160
Epoxy: Glass cloth laminate: Filament wound composite	230-240 (hoop)
To convert psi to MPa, multiply by 145.	
Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, <i>CRC Handbook of Materials Science</i> , Vol. 3, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and <i>Engineered Materials Handbook</i> , Vol.2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.	

2. الصلابة الإنضغاطية (Compressive Strength)

ملحق (2ب) الصلابة الانضغاطية لبعض البوليمرات
الصفحة 1 من 3

Polymer	Compressive Strength (1000 psi)
ABS Resins; Molded, Extruded: Medium impact	0.5—11.0
Polyester, Cast Thermoset: Flexible	1—17
Styrene acrylonitrile (SAN), Glass fiber (30%) reinforced	2.3
Polystyrene, Molded: Medium impact	4—9
Polystyrene, Molded: High impact	4—9
PVC—acrylic injection molded	6.2
ABS Resins; Molded, Extruded: High impact	7.0—9.0
PVC—acrylic sheet	8.4
Chlorinated polyether	9
ABS Resins; Molded, Extruded: Heat resistant	9.3—11.0
Silicone, Molded: Fibrous (glass) reinforced silicones	10—12.5
Rubber phenolic, Molded: , chopped fabric filled	10—15
Rubber phenolic, Molded: , asbestos filled	10—20
Silicone, Molded: Granular (silica) reinforced silicones	10.6—17
Polyvinyl Chloride: Rigid—normal impact	11—12
ABS—Polycarbonate Alloy	11.1—11.8
Polystyrene, Molded: General purpose	11.5—16.0
Phenylene Oxide: SE—100	12
Rubber phenolic, Molded: woodflour or flock filled	12—20
Polyester, Cast Thermoset: Rigid	12—37
Polycarbonate	12.5
Polyester; Thermoplastic Moldings: General purpose grade	13
Phenylene oxide (Noryl): Standard	13.9—14
Silicone, Laminated with woven glass fabric	15—24
Phenolic; Molded: High shock, chopped fabric or cord filled	15—30
Polyester; Thermoplastic Moldings: Glass reinforced grades	16—18
Alkyds; Molded: Granular (high speed molding)	16—20
Phenylene Oxide: SE—1	16.4

ملحق (2ب) الصلابة الإنضغاطية لبعض البوليمرات
الصفحة 2 من 3

Polymer	Compressive Strength (1000 psi)
Epoxy, Standard : Cast rigid	16.5—24
Epoxy, High performance resins: Cast, rigid	17—19
Phenolic; Molded: Very high shock, glass fiber filled	17—30
Phenylene Oxide: Glass fiber reinforced	17.6—17.9
Polyarylsulfone	17.8
Polyester; Thermoplastic: Glass reinforced, self extinguishing	18
Diallyl Phthalate; Molded: Asbestos filled	18—25
Polymide: Unreinforced	18.4, 27.4
Polycarbonate (40% glass fiber reinforced)	18.5
Polystyrene, Molded: Glass fiber -30% reinforced	19
Alkyds; Molded: Putty (encapsulating)	20—25
Diallyl Phthalate; Molded: Orlon filled	20—25
Polyester: Heat and chemical resistant (asbestos reinforced)	20—25
Polyester: High strength, (glass fibers reinforced)	20—26
Diallyl Phthalate; Molded: Dacron filled	20—30
Phenolic, Molded: Arc resistant, mineral filled	20—30
Melamine; Molded: Glass fiber filled	20—42
Epoxy, High performance resins: Molded	22—26
Phenolic; Molded: General, woodflour and flock filled	22—36
Polyester: Sheet molding compounds, general purpose	22—36
Thermoset Carbonate: Allyl diglycol carbonate	22.5
Alkyds; Molded: Glass reinforced (heavy duty parts)	24—30
Phenolic; Molded: Shock, paper, flock, or pulp filled	24—35
Diallyl Phthalate; Molded: Glass fiber filled	25
Melamine; Molded: Cellulose electrical filled	25—35
Urea, Molded: Woodflour filled	25—35
Urea, Molded: Alpha—cellulose filled (ASTM Type I)	25—38
Melamine; Molded: Mineral filled	26—30

To convert psi to MPa, multiply by 145.

Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, *CRC Handbook of Materials Science*, Vol. 3, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and *Engineered Materials Handbook*, Vol.2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.

ملحق (2ب) الصلابة الانضغاطية لبعض البوليمرات
الصفحة 3 من 3

Polymer	Compressive Strength (1000 psi)
Alkyds; Molded: Rope (general purpose)	28
Epoxy novolac: Cast, rigid	30—50
Epoxy, Standard : Molded	34-38
Melamine; Molded: Unfilled	40—45
Melamine; Molded: Alpha cellulose filled	40—45
Polymide: Glass reinforced	42
Epoxy novolac: Glass cloth laminate	48—57
Epoxy, Standard : General purpose glass cloth laminate	50-60
Epoxy, High performance resins: Glass cloth laminate	67—71
Epoxy, Standard : High strength laminate	80-90 (edgewise)

3. صلابة الخضوع (Yield Strength)

ملحق (2ج) صلابة الخضوع لبعض البوليمرات

الصفحة 1 من 2

Polymer	Yield Strength, (ASTM D638) (10 ³ psi)
Polypropylene: High impact	2.8—4.3
Polystyrene, Molded: High impact	2.8—5.3
Polypropylene: Asbestos filled	3.3—8.2
Polypropylene: Flame retardant	3.6—4.2
Polystyrene, Molded: Medium impact	3.7—6.0
Nylon; Molded or Extruded: Type 8	3.9
Polypropylene: General purpose	4.5—6.0
Polystyrene, Molded: General purpose	5.0—10
Polymide: Unreinforced	5—7.5
PVC-acrylic injection molded	5.5
Nylon; Molded or Extruded: Type 12	5.5—6.5
Chlorinated Polyether	5.9
PVC-acrylic sheet	6.5
Polypropylene: Glass reinforced	7—11
Nylon, Type 6/10; Molded or Extruded: General purpose	7.1—8.5
Nylon; Molded or Extruded: Flexible copolymers	7.5—10.0
Polyester Injection Moldings: General purpose grade	7.5—8
Phenylene Oxide: SE—100	7.8
Nylon, Type 6/6: General purpose molding	8.0—11.8
Polyarylsulfone	8—12
ABS-Polycarbonate Alloy	8.2
Polyester: General purpose grade	8.2
Polycarbonate	8.5
Nylon; Molded or Extruded: Type 11	8.5
Nylon; Molded or Extruded: General purpose	8.5—12.5
Nylon, Type 6/6: General purpose extrusion	8.6—12.6
Polyacetal Copolymer: Standard	8.8
Polyacetal Copolymer: High flow	8.8

To convert psi to MPa, multiply by 145.

Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, *CRC Handbook of Materials Science*, Vol. 3, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and *Engineered Materials Handbook*, Vol.2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.

ملحق (ج2) صلابة الخضوع لبعض البوليمرات
الصفحة 2 من 2

Polymer	Yield Strength. (ASTM D638) (10 ³ psi)
Polyphenylene sulfide: Standard	9.511
Phenylene Oxide: SE—1	9.6
Polyacetal Homopolymer: Standard	10
Phenylene oxide (Noryl): Standard	10.2
Polyester: Asbestos filled grade	12
Nylon; Molded or Extruded: Cast	12.8
Polyester: Glass reinforced grade	14
Polystyrene, Molded: Glass fiber 30% reinforced	14
Phenylene Oxide: Glass fiber reinforced	14.5—17.0
Polyester Moldings: Glass reinforced self extinguishing	17
Phenylene oxide (Noryl): Glass fiber reinforced	17—19
Polyester Injection Moldings: Glass reinforced grades	17—25
Styrene acrylonitrile (SAN): Glass fiber (30%) reinforced	18
Polyacetal Copolymer: 25% glass reinforced	18.5
Polyphenylene sulfide: 40% glass reinforced	20—21
Nylon, Type 6/6; Molded or Extruded: Glass fiber reinforced	25
Polymide: Glass reinforced	28

To convert psi to MPa, multiply by 145.

Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, *CRC Handbook of Materials Science*, Vol. 3, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and *Engineered Materials Handbook*, Vol.2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.

4. صلابة الانحناء (Flexural Strength)

ملحق (د2) صلابة الانحناء لبعض البوليمرات
الصفحة 1 من 4

Polymer	Flexural Strength (ASTM D790) (10 ³ psi)
Epoxy, Standard: Cast flexible	1.2—12.7
Cellulose Acetate Butyrate, ASTM Grade: S2	2.5—3.95 (yield)
Fluorinated ethylene propylene(FEP)	3 (0.1% offset)
Nylon, Type 6: Flexible copolymers	3.4—16.4
Polytrifluoro chloroethylene (PTFCE)	3.5 (0.1% offset)
Cellulose Acetate, ASTM Grade: S2—1	3.5—5.7 (yield)
Cellulose Acetate, ASTM Grade: MS—1, MS—2	3.8—7.1 (yield)
Polyesters, Cast Thermoset: Flexible	4—16
Polypropylene: High impact	4.1 (yield)
Cellulose Acetate, ASTM Grade: MH—1, MH—2	4.4—8.65 (yield)
Chlorinated polyether	5 (0.1% offset)
ABS Resins; Molded or Extruded: Low temperature impact	5—8
Cellulose Acetate Propionate, ASTM Grade: 3	5.6—6.2 (yield)
Cellulose Acetate Butyrate, ASTM Grade: MH	5.6—6.7 (yield)
Cellulose Acetate, ASTM Grade: H2—1	6.0—10.0 (yield)
ABS Resins; Molded or Extruded: Very high impact	6.0—9.8
Silicone: Granular (silica) reinforced	6—10
Melamines, Molded: Cellulose filled, electrical	6—15
Reinforced polyester: High strength (glass fibers)	6—26
Polypropylene: General purpose	6—7 (yield)
Polymide: Unreinforced	6.6—11
Cellulose Acetate Propionate, ASTM Grade: 1	6.8—7.9 (yield)
Rubber phenolic—chopped fabric filled	7
Rubber phenolic—asbestos filled	7
Alkyd, Molded: Granular (high speed molding)	7—10
Rubber phenolic—woodflour or flock filled	7—12
Diallyl Phthalate, Molded: Orlon filled	7.5—10.5
Urea, Molded: Woodflour filled	7.5—12.0

ملحق (د2) صلابة الانحناء لبعض البوليمرات
الصفحة 2 من 4

Polymer	Flexural Strength (ASTM D790) (10 ³ psi)
Urea, Molded: Cellulose filled (ASTM Type 2)	7.5—13
Polypropylene: Asbestos filled	7.5—9 (yield)
ABS Resins; Molded or Extruded: High impact	7.5—9.5
6/10 Nylon: General purpose	8
Phenolic: Shock: paper, flock, or pulp filled	8.0—11.5
Diallyl Phthalate, Molded: Asbestos filled	8—10
Alkyd, Molded: Putty (encapsulating)	8—11
Polypropylene: Glass reinforced	8—11 (yield)
Phenolic: High shock, chopped fabric or cord filled	8—15
Urea, Molded: Alpha—cellulose filled (ASTM Type 1)	8—18
Polyesters, Cast Thermoset: Rigid	8—24
Cellulose Acetate, ASTM Grade: H4—1	8.1—11.15 (yield)
Phenolic: General, woodflour and flock filled	8.5—12
Polyvinylidene— fluoride (PVDF)	8.6—10.8 (0.1% offset)
PVC—acrylic injection molded	8.7
Acrylic Moldings: High impact grade	8.7—12.0
Cellulose Acetate Butyrate, ASTM Grade: H4	9 (yield)
Diallyl Phthalate, Molded: Dacron filled	9—11.5
Melamines, Molded: Unfilled	9.5—14
ABS Resins; Molded or Extruded: Medium impact	9.9—11.8
Epoxy, High performance resins: Molded	10—12
Phenolic: Arc resistant—mineral filled	10—13
Reinforced polyester: Heat and chemical resistant (asbestos)	10—13
Polystyrene: General purpose	10—15
Diallyl Phthalate, Molded: Glass fiber filled	10—18
Phenolic: Very high shock, glass fiber filled	10—45
PVC—acrylic sheet	10.7
ABS Resins; Molded or Extruded: Heat resistant	11.0—12.0

ملحق (د2) صلابة الانحناء لبعض البوليمرات
الصفحة 3 من 4

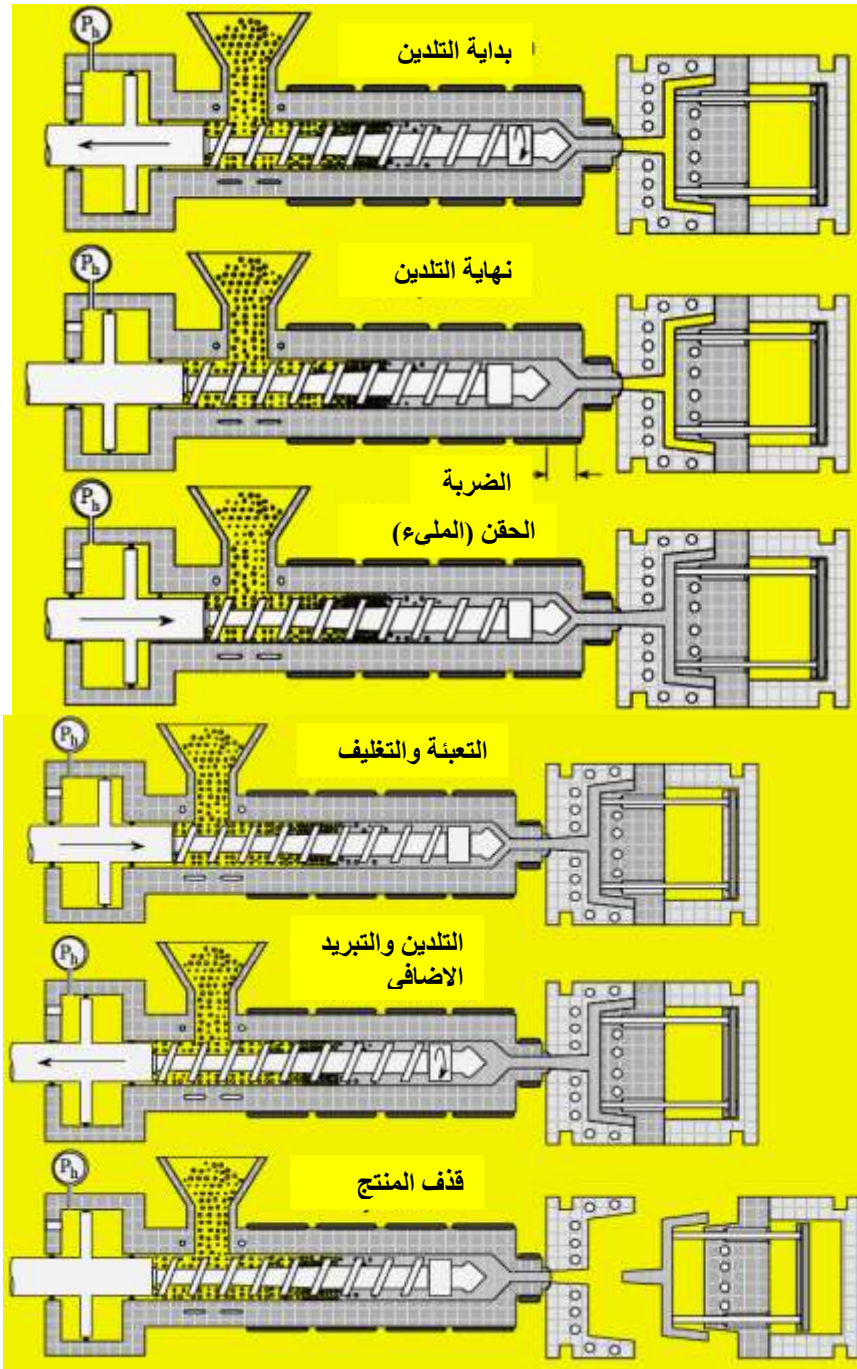
Polymer	Flexural Strength (ASTM D790) (10 ³ psi)
Epoxy, High performance resins: Cast, rigid	11—16
Melamines, Molded: Alpha cellulose filled	11—16
Polyvinyl Chloride And Copolymers: Rigid—normal impact	11—16
Polyester Injection Moldings: General purpose grade	12
Epoxy novolacs: Cast, rigid	12—13
Acrylic, Cast Resin Sheets, Rods: General purpose, type I	12—14
Alkyd, Molded: Glass reinforced (heavy duty parts)	12—17
Polyester Injection Moldings: General purpose grade	12.8
Phenylene Oxide: SE—100	12.8
Polyacetal Copolymer: Standard	13
Polyacetal Copolymer: High flow	13
Polycarbonate	13.5
Phenylene Oxide: SE—1	13.5
Epoxy, Standard: Cast rigid	14—18
Melamines, Molded: Glass fiber filled	14—18
Polyacetal Homopolymer: Standard	14.1
ABS—Polycarbonate Alloy	14.3
Chlorinated polyvinyl chloride	14.5
Acrylic Moldings: Grades 5, 6, 8	15—16
Acrylic, Cast Resin Sheets, Rods: General purpose, type II	15—17
Vinylidene chloride	15—17
Phenylene oxides (Noryl): Standard	15.4
Silicone: Fibrous (glass) reinforced	16—19
Polyarylsulfone	16.1—17.2
Nylon, Type 6: Cast	16.5
Polystyrene: Glass fiber —30% reinforced	17
Melamines, Molded: Alpha mineral filled	18—10
Polyester Injection Moldings: Glass reinforced grade	19
To convert from psi to MPa, multiply by 145.	
Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, <i>CRC Handbook of Materials Science, Vol. 3</i> , CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and <i>Engineered Materials Handbook, Vol.2, Engineering Plastics</i> , ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.	

ملحق (د2) صلابة الانحناء لبعض البوليمرات
الصفحة 4 من 4

Polymer	Flexural Strength (ASTM D790) (10 ³ psi)
Polyester Injection Moldings: Asbestos—filled grade	19
Alkyd, Molded: Rope (general purpose)	19—20
Epoxy, Standard: Molded	19—22
Polyphenylene sulfide: Standard	20
Phenylene Oxide: Glass fiber reinforced	20.5—22
Styrene acrylonitrile (SAN): Glass fiber (30%) reinforced	22
Polyester Injection Moldings: Glass reinforced grades	22—24
6/10 Nylon: Glass fiber (30%) reinforced	23
Polyester Injection Moldings: Glass reinforced self extinguishing	23
Phenylene oxides (Noryl): Glass fiber reinforced	25—28
6/6 Nylon: Glass fiber Molybdenum disulfide filled	26—28
Reinforced polyester sheet molding: general purpose	26—32
Nylon, Type 6: Glass fiber (30%) reinforced	26—34
6/6 Nylon: Glass fiber reinforced	26—35
Polycarbonate (40% glass fiber reinforced)	27
Polyacetal Copolymer: 25% glass reinforced	28
Silicone: Woven glass fabric/ silicone laminate	33—47
Polyphenylene sulfide: 40% glass reinforced	37
Polymide: Glass reinforced	56
Epoxy, High performance resins: Glass cloth laminate	70—72
Epoxy, Standard: General purpose glass cloth laminate	80—90
Epoxy novolacs: Glass cloth laminate	84—89
Epoxy, Standard: High strength laminate	165—177
Epoxy, Standard: Filament wound composite	170—180
Nylon, Type 6: General purpose	Unbreakable
6/6 Nylon: General purpose molding	Unbreakable

To convert from psi to MPa, multiply by 145.

Source: data compiled by J.S. Park from Charles T. Lynch, *CRC Handbook of Materials Science*, Vol. 3, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and *Engineered Materials Handbook*, Vol.2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.



مراحل عملية القولبة بالحقن

المصادر العربية

1. تكنولوجيا صناعة القوالب، أعداد المهندس سليمان خليفة، الطبعة الأولى، شعاع للنشر والعلوم، حلب - سوريا، (1998).
2. تكنولوجيا وكيمياء البوليمرات، تأليف د. كوركيس عبد ال آدم و د. حسين علي كاشف الغطاء، وزارة التعليم والبحث العلمي، مطبعة البصرة، العراق، (1983).
3. خواص البلاستيك والطباعة بالسلك سكرين، تأليف محمد إسماعيل عمر، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، عابدين القاهرة.
4. البلاستيك تصميم وإنتاج، ترجمة وأعداد سليمان خليفة وجمال عمران، دار دمشق للطباعة والنشر والتوزيع، دمشق-سوريا، (1991).
5. المواد الهندسية، تأليف الدكتور عياد عبدالواحد والدكتور كمال زاهر، المكتب الوطني للبحث والتطوير، دار الكتب الوطنية- بنغازي، (2004).
6. المواد المركبة الصديقة للبيئة والقابلة لإعادة الاستخدام، مجلة جامعة الملك عبدالعزيز؛ م77، 16-102، (2005).

المصادر الأجنبية

1. Fundamental of Materials Science & Engineering, William D. Callister, Jr. John Wiley & Sons, Inc.(2001).
2. Material Engineering Science Processing & Design, Michael Ashby, Hugh Shercliff and David Cebon.,1st Edition, Published by Elsevier Ltd.,(2007).
3. Materials Science And Engineering Handbook, [edited by] James F. Shackelford,William Alexander.—3rd ed.,(2001)
4. Simulation Methods of Polymers, edited by Michael Kotelyans kii, by Marcel Dekker, Inc. ,(2004).
5. Manufacturing Processes and Materials for Engineers, Doyle, Lawrence E , by Prentice-Hall, Inc., U.S.A. ,(1985).
6. Manufacturing Systems Engineering, Gershwin, S. B. , Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.,(1994).
7. Fundamentals of Modern Manufacturing (Materials, Processes and System), Groover, M. P., Prentice-Hall , Englewood Cliffs, NJ, (1996).
8. Manufacturing Processes, Yankee, H. W., by Prentice-Hill, Inc., U.S.A.,(1979).
9. Plastics Products Design Handbook, Part A (Materials & Components), Miller, E., Marcel Dekker, Inc., (1981).
- 10.Engineering Materials: Properties & Selection, Budiniski, K., by Reston Publishing Company, Inc.,(1979).
- 11.Manufacturing Processes, Amstead B. H., Phillip F.O., & Myron L.B., John Wiley & Sons, Inc.,(1979).
- 12.How To Make Injection Mold, George Manges and Paul Mohern, Hanser Publisher, 2nd Edition, (1993).

13. Plastic For Engineers, H. Domininighous, Hanser Publisher, 3rd Edition,(1993).
14. Materials Science of Polymers for Engineering, Osswald T.A. & Hanser G. M., 2nd Edition, Munich,(2003).
15. Design Guides for Plastics, Robin Kent, By: British Plastic Federation, U.K.,(2004).
16. Liquid Crystalline Polymers, Wang X J & Zhou Q F, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.(2004).
17. ASM International, The Materials Information Company, Handbook Committee. II. Metals Handbook.(2001).

مواقع شبكة الانترنت

1. <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/compositesdesign/index.htm>
1
2. http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=main_page
3. http://wapedia.mobi/en/Composite_material
4. <http://www.madehow.com/Volume-4/Carbon-Fiber.html>
5. <http://www.umms.sav.sk/index.php?ID=130&pg=8>
6. <http://www.azom.com?Article ID=2984>

هذا الكتاب

يهتم بمجال تقنيات تصنيع اللدائن والمواد المركبة بصورة عامة ويهدف إلى تقديم فكرة أساسية عن طبيعة تكوين اللدائن والمواد المركبة وأنواعها والتقنيات المستخدمة في تقويتها وتشكيلها بالإضافة إلى استعراض لأهم تطبيقاتها في المجالات الميكانيكية..... بأسلوب مبسط يناسب طلاب كليات الهندسة والمعاهد التقنية المختلفة. لقد تم أعداد الكتاب بطريقة تُسهل على القارئ الحصول على المعلومات الأساسية بسهولة ويسر من خلال الشرح المبسط والرسومات التوضيحية والجداول العملية والتي ستسهم في تيسير وصول الفكرة إلى القارئ وتنمي قدراته الاستيعابية.

يتألف هذا الكتاب من خمسة عشر فصل يشرح المواضيع التالية:
 المواد المتبلورة- تقنيات تشكيل اللدائن- تصميم قوالب المنتجات البلاستيكية- أنظمة المبلمرات-البوليمرات المستخدمة في المكونات الإنشائية-التطبيقات الميكانيكية للبوليمرات-تطبيقات الطلاء بالبوليمرات- استخدامات البوليمرات كمواد لاصقة-تقنيات لحام اللدائن-اللدائن والبيئة- المواد المركبة-تخمين خواص المواد المركبة-المواد المركبة المعدنية-المواد المركبة اللدائنية-المواد المركبة السيراميكية-المواد المركبة الهيكلية.