

УДК 621.742.487.54.07

Е.А. Вешкин¹, В.И. Постнов¹, В.В. Семенычев¹, Е.В. Крашенинникова¹**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ И СКЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЯЗУЮЩЕГО УП-2227Н, ОТВЕРЖДЕННОГО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-39-45

На образцах связующего УП-2227Н, отвержденного по четырем различным температурно-временным режимам, провели оценку изменения величины микротвердости в зависимости от степени отверждения полученных пластиков и выбранной зоны поперечного сечения (по высоте) образца. Установлено, что с ростом температуры и времени выдержки микротвердость пластика увеличивается. Склерометрические исследования также подтвердили зависимость ширины бороздок от режимов отверждения пластика: чем больше ширина бороздки, тем меньше степень отверждения образца и, наоборот, чем меньше ширина русла бороздки, тем выше степень отверждения и величина микротвердости пластика. Показано, что величина микротвердости пластика по его толщине возрастает от поверхности образца к его сердцевине, а ширина склерометрической бороздки соответственно уменьшается.

Ключевые слова: связующее УП-2227Н, склерометрия, микроскопические исследования, микротвердость, степень отверждения.

Е.А. Veshkin¹, V.I. Postnov¹, V.V. Semenychev¹, E.V. Krasheninnikova¹**RESEARCH OF MICROHARDNESS AND SCLEROMETRIC CHARACTERISTICS OF THE BINDING UP-2227N, CURED BY DIFFERENT REGIMES**

Estimate change in microhardness depending on the degree of hardening of the obtained plastics and, depending on the selected cross-sectional area (height) of the sample is made on samples of the binding UP-2227N cured by four different temperature and time regimes. It has been established that microhardness of plastic increases with rising temperature and holding time. Sclerometric studies also confirmed the dependence of the width of grooves on the plastic curing conditions: the more width of the groove is, the less degree of curing of the sample is, and vice versa, the less channel width of the groove is, the more degree of cure and microhardness of the plastic are. It is shown that microhardness of the plastic increases in thickness from the surface of the sample to its core, and the width of the sclerometric groove, respectively, decreases.

Keywords: binding UP-2227N, sclerometry, microscopic examination, microhardness, degree of curing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Связующее УП-2227Н представляет собой раствор эпоксидной композиции в смеси органических растворителей – ацетона и изопропилового спирта. В настоящее время созданием новых связующих для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения занимаются регулярно с учетом возрастающего интереса к полимерным композициям и объемам их применения в промышленности [1–3].

В связи с постоянно расширяющимися объемами использования полимерных композиционных материалов (ПКМ), вопрос снижения издержек при сохранении качества в производстве летательных аппаратов выходит на первый план и заставляет производителей искать пути снижения их себестоимости за счет внедрения новых материалов и энер-

госберегающих технологий [4, 5]. Высокий уровень свойств ПКМ является тем основным моментом, благодаря которому композиционные материалы получили широкое распространение [6, 7].

Совокупность выбранных связующего и наполнителя в сочетании с примененным технологическим процессом изготовления деталей и обуславливает высокие свойства ПКМ [8, 9]. Ассортимент, применяемых в промышленности наполнителей для ПКМ, как правило, невелик (стекло-, угле-, органоткани), значительно шире номенклатура применяемых связующих, так как в каждом классе связующих содержатся целые группы их разновидностей, а вот количество технологических приемов получения полуфабриката или детали на их основе, особенно секретов производства, постоянно растет [10].

В последнее время в материаловедческих работах все чаще появляются публикации, в которых в качестве исследовательского прибора применяется скретч-тестер (склерометр) [11]. Большинство таких публикаций посвящено исследованию характеристик хромовых или никелевых гальванических покрытий, осажденных как на металлическую [12, 13], так и на неметаллическую подложку из ПКМ [14]. Представлены работы, в которых склерометр применялся для оценки склонности алюминиевых сплавов к межкристаллитной коррозии [15], а также для оценки триботехнических характеристик [16].

Разработка наукоемких технологий и оценка свойств полученных материалов всегда сопряжена с необходимостью получения повышенной информативности проводимых исследований [17]. К таким исследованиям следует отнести и склерометрию, которая позволяет получить новую измеряемую информацию о предмете исследования [18, 19]. Таким образом, цель данной работы заключается в оценке чувствительности лабораторного склерометра при изучении степени отверждения связующего УП-2227Н, а также в оценке эффективности применения методов склерометрии к пластиковым неармированным образцам.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [20].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований использованы пластиковые образцы, изготовленные из отвержденного по следующему режимам связующего УП-2227Н: при 130°C в течение 2,5 ч; при 140°C в течение 2 ч; при 140°C в течение 3 ч; при 160°C в течение 2 ч. Образцы представляли собой плоские диски Ø60 мм, толщина образцов варьировалась в пределах – от 1,3 до 2,8 мм. Измерение величины микротвердости образцов с различными режимами отверждения проводили с помощью микротвердомера ПМТ-3М. Микротвердость измеряли на лицевой поверхности и по высоте образцов (поперечное сечение) по приведенной далее схеме, при этом нагрузка на индентор микротвердомера составляла 0,5 Н (50 г). Средние значения величины микротвердости определяли по десяти замерам.

Величину микротвердости образцов рассчитывали на основании измеренных длин диагоналей отпечатков пирамиды микротвердомера по формуле: $H=1854 \cdot P/C^2$ (где H – микротвердость, кг/мм²; P – нагрузка, г; C – диагональ отпечатка, мкм). После проведения расчета величины микротвердости полученное значение умножали на 9,81 для перевода размерности в систему СИ (МПа).

Царапины на лицевую сторону образцов и по их высоте наносили с помощью лабораторного склерометра. Склерометр представляет собой прецизионный механизм, позволяющий с заданной нагрузкой и скоростью перемещать по поверхности образца алмазный индентор. Этот индентор имеет вид конуса с углом при вершине, равным 120 град, а радиус скругления его вершины составляет 200 мкм, при этом нагрузка на индентор составляла 10 Н (1 кг). Скорость перемещения образца относительно индентора составляла 1 мм/с.

Наведенные на лицевой и торцевой поверхности пластиковых образцов с помощью склерометра бороздки исследовали с помощью инвертированного микроскопа «Олимпус». При микроскопических исследованиях образцов оценивали ширину бороздок в зависимости от режимов отверждения связующего и зоны ее расположения по толщине (высоте) образца. Для оценки морфологии поверхности образцов с различными режимами отверждения и для их сравнения сделали фотоснимки. Строе и ширину русла бороздок также зарегистрировали с помощью фотокамеры микроскопа.

Величину шероховатости лицевой поверхности образцов с различными режимами отверждения измеряли в микрометрах с помощью профилометра Mitutoyo Surf test SJ-210, среднее значение шероховатости определяли по результатам пяти измерений. Подготовку поперечных шлифов для изучения русла бороздок после нанесения царапин проводили на шлифовально-полировальном комплексе Struers A/S. Степень отверждения образцов связующего УП-2227Н определяли с помощью дифференциально-сканирующего калориметра DSC 204 F1.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 показаны фотоснимки внешнего вида лицевой поверхности образцов и склерометрических бороздок с указанием их ширины.

Анализ внешнего вида лицевой поверхности образцов свидетельствует о том, что наиболее развитая поверхность принадлежит образцам с наименьшей температурой отверждения (130°C в течение 2,5 ч). Эти же образцы оказывают наименьшее сопротивление внедрению индентора склерометра, так как именно на них получена наиболее широкая бороздка, ширина которой составила 307 мкм. Образцы с более высокими температурами отверждения имеют более гладкую лицевую поверхность по сравнению с образцами с наименьшей температурой отверждения. Следует также отметить, что образцам с максимальными температурой отверждения (160°C в течение 2 ч) и длительностью воздействия температуры (140°C в течение 3 ч) свойственно наличие поверхностной пористости.

В табл. 2 представлены практически все экспериментальные данные, полученные для лицевой поверхности образцов с различными режимами отверждения.

Таблица 1

Внешний вид поверхности и бороздок образцов


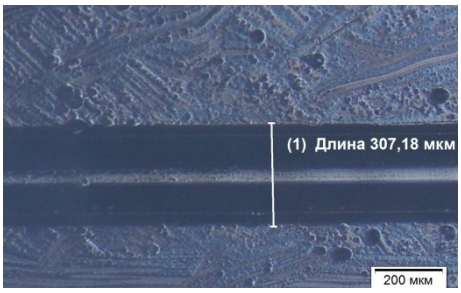
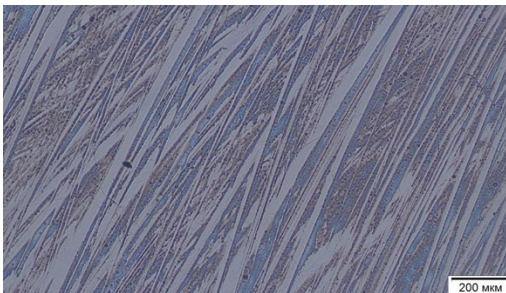
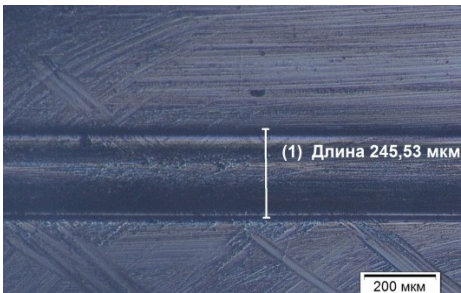
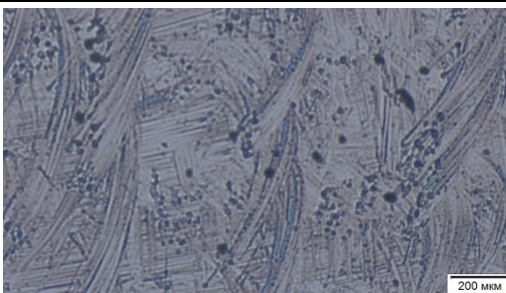
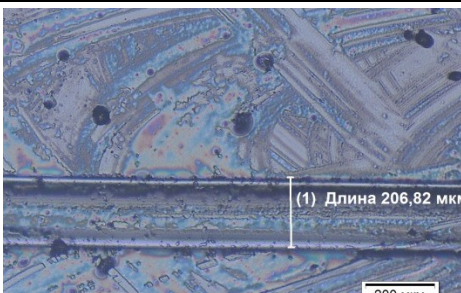
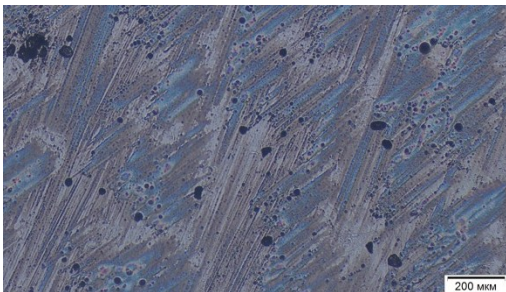
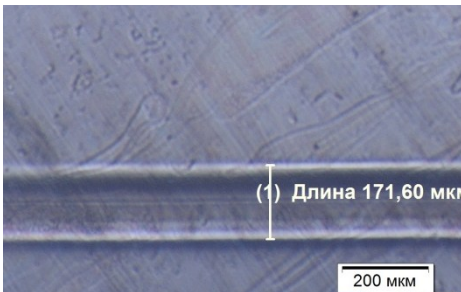
Режим отверждения	Внешний вид поверхности	Внешний вид бороздки
130°C, 2,5 ч		
140°C, 2 ч		
140°C, 3 ч		
160°C, 2 ч		

Таблица 2

Результаты исследований лицевой поверхности образцов

Условный номер образца	Режим отверждения	Степень отверждения, %	Длина диагонали, мкм	Микротвердость, МПа	Ширина бороздки, мкм (10 Н)	Шероховатость, мкм
1	130°C, 2,5 ч	70	60,75	246	307	0,471
2	140°C, 2 ч	80	51,50	343	246	0,301
3	140°C, 3 ч	90	47,10	410	207	0,204
4	160°C, 2 ч	98	45,30	443	172	0,091

Как видно из приведенных экспериментальных данных, степень отверждения образцов находится в прямой зависимости как от температуры отверждения, так и от длительности отверждения. Действительно, минимальной температуре отверждения пластика (130°C) соответствует и минимальная степень его отверждения (70%). Образцы, отвержденные при одинаковой температуре (140°C), но с разной длительностью выдержки (2 и 3 ч), показали и разную степень отверждения: большей степени отверждения (90%) соответствует и большее время выдержки при этой температуре. Выдержка связующего при температуре 160°C в течение 2 ч позволила достичь в образцах степени отверждения, равной 98%.

Продолжая анализировать результаты, приведенные в табл. 2, обратим внимание на сложившиеся взаимосвязи степени отверждения исследуемых пластиков с их микротвердостью, шириной склерометрических бороздок и шероховатостью лицевой поверхности. Большой степени отверждения соответствуют и большие величины микротвердости, причем этот вывод характерен для всех исследованных образцов, так же как и то, что большей степени отверждения соответствует меньшая ширина склерометрической бороздки и меньшая величина шероховатости лицевой стороны пластикового образца. Проведенный анализ свидетельствует о том, что аналогичные сопоставления можно применить и для базы отсчета в виде величины микротвердости или ширины склерометрических бороздок, не нарушая общую закономерность, выявленную экспериментально.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что все измеренные характеристики образцов, отвержденных по различным температурно-временным режимам, зависят друг от друга, следовательно, в качестве базового параметра для оценки степени отверждения пластика можно выбирать любой – например, тот, который проще и быстрее определяется. Действительно, чем выше величина микротвердости пластика, тем большая у него степень отверждения и, соответственно, меньшие значения шероховатости поверхности и ширины склерометрических бороздок. Аналогичные рассуждения можно привести и для других измеренных критериев степени отверждения. Эти принципы можно распространить и на другие виды связующих – важно определить на выбранном связующем стандартным методом требуемую степень его отверждения и какой-либо измеряемый параметр, например микротвердость или ширину склерометрической бороздки.

Рассмотрим проблему изменения микротвердости и вида склерометрической бороздки в объеме пластика, причем для измерений этих параметров выберем образцы пластика с минимальной и максимальной степенью отверждения. Как было показано ранее, такими пластиками являются образцы, отвержденные по режимам 130°C, 2,5 ч и

160°C, 2 ч. Естественно, что результаты измерений пластиков с другими режимами отверждения займут какое-либо промежуточное положение, но в данном случае это не является чем-то особо важным, так как необходимо установить сам принцип изменения исследуемых параметров.

В связи с тем, что отверждение пластика во всем его объеме происходит не мгновенно и не одновременно, а в первую очередь в зонах непосредственного температурного воздействия, условия отверждения пластика в различных зонах будут неодинаковыми, а это непременно скажется на значениях микротвердости пластика в этих зонах. Поэтому для того, чтобы однозначно решить вопрос с закономерностями изменения значений микротвердости в объеме пластика необходимо, прежде всего, ввести терминологию, которая позволит принципиально отличать исследуемые зоны.

Исследование изменения микротвердости образцов, отвержденных при различных режимах в объеме пластика, проводили на поперечных шлифах, причем зоны, в которых определяли величины микротвердости, определенным образом систематизировали. При разработке методики исследования микротвердости в объеме пластика ввели определенные понятия, характеризующие относительную глубину залегания зоны измерения по высоте образца. Поперечное сечение образца условно разделили на пять равных симметричных по высоте зон: две крайние зоны, включающие лицевую и оборотную стороны образца, назвали «подповерхностными»; две прилегающие зоны к подповерхностным назвали «полусредними», а центральную зону, граничащую с полусредними зонами, – «сердцевинной». Такая систематизация позволила провести измерения микротвердости пластика по зонам, параллельным плоскости образца, и по всей его высоте, а также сравнить полученные результаты измерений в различных и одноименных зонах. На рис. 1 показано симметричное расположение зон по высоте (сечению) образца.

Подповерхностная
Полусредняя
Сердцевинная
Полусредняя
Подповерхностная

Рис. 1. Зоны поперечного сечения образца

В табл. 3 приведены результаты измерений диагоналей отпечатков индентора микротвердомера, причем показаны как текущие значения, так и усредненные данные для предложенных зон исследования микротвердости применительно к

Таблица 3

Значения микротвердости и величина диагонали отпечатка по сечению образца, отвержденного по режиму 130°C в течение 2,5 ч

Условный номер образца	Зона измерения	Величина диагонали отпечатка, мкм		Микротвердость, МПа
		текущее значение	среднее значение	
1	Подповерхностная	65,5; 69,0; 66,3; 66,4; 67,2	66,9	203
2	Полусредняя	63,9; 64,6; 63,6; 65,0; 63,0	64,0	222
3	Сердцевидная	58,9; 58,6; 58,6; 59,5; 58,9	58,9	262
4	Полусредняя	61,9; 63,7; 63,8; 63,2; 63,0	63,1	228
5	Подповерхностная	64,0; 64,1; 68,1; 67,5; 66,0	66,0	208

пластиковому образцу, отверженному по режиму 130°C в течение 2,5 ч.

В табл. 3 текущие значения диагоналей отпечатков алмазной пирамиды даны не случайно, а для акцентирования внимания на то, что результаты этих измерений в пределах одной или одноименных зон расположены достаточно близко друг к другу. Анализ результатов, приведенных в табл. 3, обнаруживает четкую закономерность, касающуюся системы изменения величины микротвердости пластика по его объему: чем ближе к сердцевине пластика находится зона измерения, тем выше будут значения микротвердости. Значения микротвердости в более удаленных зонах от сердцевины образца (полусредние и подповерхностные), соответственно, падают. Таким образом, будем считать установленным, что величина микротвердости пластика возрастает от его поверхности к сердцевине. Так, для рассматриваемого образца с режимом отверждения 130°C в течение 2,5 ч, величина микротвердости увеличивается следующим образом: 205 МПа→225 МПа→262 МПа.

Аналогичными по полученным закономерностям, но с более высокими измеренными значениями выглядят результаты для пластикового образца, отвержденного по режиму 160°C в течение 2 ч, которые приведены в табл. 4.

В табл. 4, так же как и для образца, отвержденного с минимальной температурой (130°C), наблюдается аналогичная картина. Среднее значение микротвердости в подповерхностных зонах получилось равным 402 МПа, в полусредних зонах 468 МПа, а в сердцевинной зоне, как и ожидалось, самое высокое значение в объеме пластика, соответствующее 566 МПа. Сравнивая микротвердость пластиков, отвержденных при минимальной (130°C) и максимальной (160°C) температурах, следует отметить, что значения микротвердости в объеме пластика, отвержденного при максимальной температуре, приблизительно в 2 раза выше, чем для пластика с температурой отверждения, равной 130°C. Очевидно, что для пластиков, отвержденных по режимам 140°C, 2 ч и 140°C, 3 ч, значения микротвердости в объеме займут какое-то промежуточное положение между значениями, полученными на пластиках с минимальной и максимальной температурами отверждения.

После проведенных исследований по изменению микротвердости образцов в их объеме, целесообразно также проверить и наличие обнаруженной на поверхности образцов зависимости микротвердости и ширины склерометрической бороздки, но уже в объеме пластика. Для этого на поперечном шлифе пластика, отвержденного в соответствии с режимом 160°C в течение 2 ч, с помощью лабораторного склерометра по высоте

Таблица 4

Значения микротвердости и величина диагонали отпечатка по сечению образца, отвержденного по режиму 160°C в течение 2 ч

Условный номер образца	Зона измерения	Величина диагонали отпечатка, мкм		Микротвердость, МПа
		текущее значение	среднее значение	
1	Подповерхностная	47,3; 48,9; 46,7; 45,9; 47,6	47,3	406
2	Полусредняя	42,2; 44,9; 42,9; 44,6; 45,4	44,0	470
3	Сердцевидная	40,7; 39,8; 39,9; 39,2; 41,0	40,1	566
4	Полусредняя	44,6; 43,5; 43,8; 45,6; 43,7	44,2	465
5	Подповерхностная	47,1; 48,0; 46,5; 48,2; 49,3	47,8	398

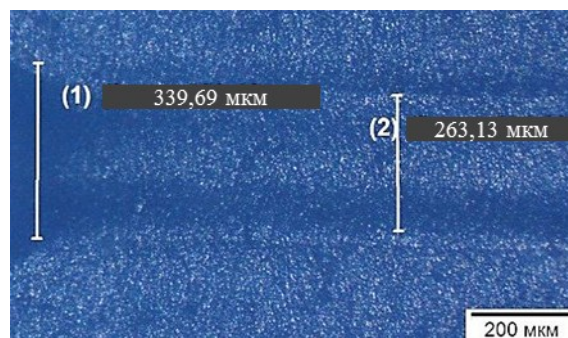


Рис. 2. Ширина бороздки по высоте образца

образца наносили царапины, геометрическую форму которых впоследствии изучали с помощью микроскопа «Олимпус». На рис. 2 представлена фотография образовавшейся склерометрической бороздки, наведенной по высоте образца, с проставленными результатами измерений ширины бороздки в подповерхностной зоне и в зоне сердцевины.

Из представленного фотоснимка (рис. 2) видно, что ширина бороздки, измеренная в районе подповерхностной зоны, равна 339 мкм, а ширина бороздки, измеренная в районе сердцевинной зоны, равна 263 мкм, т. е. зонам с меньшей микротвердостью соответствуют большие значения ширины бороздок и, наоборот, зонам с большей микротвердостью соответствуют меньшие значения ширины бороздок. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что измеренные характеристики в объеме пластика, такие как микротвердость и ширина склерометрической бороздки, соответствуют ранее сделанным выводам о взаимозависимости этих характеристик.

Для завершения анализа по проведенным исследованиям осталось проанализировать величины микротвердости, полученные на поверхности образцов пластиков, со значениями микротвердости, полученными в объеме пластика в обозначенных авторами зонах. Понятно, что наиболее геометрически близкими точками измерения значений микротвердости являются точки, расположенные на поверхности образцов и в подповерхностной зоне поперечного сечения образца. Казалось бы, что величина микротвердости поверхности образца должна быть меньше, чем значения микротвердости подповерхностной зоны, однако она, наоборот, несколько выше, хотя и меньше микротвердости полусредних и сердцевинных зон. Необходимо напомнить, что величина микротвердости поверхности образца с режимом отверждения 160°C, 2 ч равна 443 МПа, подповерхностной зоны 402 МПа, полусредней зоны 468 МПа, а в сердцевинной зоне 566 МПа.

Почему же поверхностный слой образца является более твердым, чем подповерхностные слои? Этому, скорее всего, способствует различная ориентация, а именно – взаимно перпендикулярная ориентация плоскостей измерения значений микротвердости. Если на поверхности образца усло-

вия формирования отпечатка от пирамиды микротвердомера практически одинаковы, то условия формирования отпечатка на торцевой плоскости будут всегда различаться за счет разной по высоте образца микротвердости. В тех зонах сечения образца (полусредняя и сердцевинная), где разница значений микротвердости со значениями подповерхностных зон образцов становится существенной, все найденные закономерности сохраняются.

Проведенные экспериментальные работы по оценке чувствительности лабораторного склерометра при изучении степени отверждения связующего УП-2227Н показали высокую эффективность применения методов склерометрии для пластиковых неармированных образцов, а следовательно, сформулированная цель работы достигнута.

Заключения

Анализ полученных экспериментальных результатов по исследованию пластиковых образцов с различной степенью отверждения, изготовленных из связующего УП-2227Н, позволил установить:

- степень отверждения образцов находится в прямой зависимости от температуры и длительности отверждения;
- величина микротвердости и ширина склерометрических бороздок зависят от степени отверждения пластика – с повышением степени отверждения пластика растут значения микротвердости и понижается ширина склерометрических бороздок;
- все измеренные характеристики образцов, отвержденных по различным температурно-временным режимам, зависят друг от друга, следовательно, в качестве базового параметра для оценки степени отверждения пластика можно выбирать любой – например, тот, который проще и быстрее определяется;
- необходимость введения специальной терминологии для оценки изменений микротвердости и склерометрических характеристик в объеме пластика по зонам, параллельным плоскости образца, и по всей его высоте;
- величина микротвердости пластика возрастает от его поверхности к сердцевине, а ширина склерометрических бороздок уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 231–242.
2. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Е. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 260–265.
3. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие нового поколения для материалов интерьера // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 265–272.
4. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 3–9.
5. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
6. Способ изготовления деталей из полимерных композиционных материалов: пат. №2574269 Рос. Федерация: №2014145771/05; заявл. 14.11.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №4.
7. Постнов В.И., Сатдинов А.И., Стрельников С.В., Антонов А.И., Вешкин Е.А. Влияние технологической подготовки производства на качество изделий из ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. №3. С. 3–6.
8. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Абрамов П.А. Особенности подготовки полимерного связующего для снижения пористости стеклопластиков, получаемых методом вакуумного формования // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011. Т. 13. №4 (2). С. 462–468.
9. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. №4 (3). С. 834–839.
10. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
11. Семенычев В.В., Салахова Р.К. Прибор для оценки свойств покрытий // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. №2. С. 60–65.
12. Семенычев В.В. Никелирование стали методом электронатирирования // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2017. №1. С. 23–27.
13. Семенычев В.В., Панарин А.В. Применение склерометрии для повышения информативности измеряемых характеристик хромовых и никелевых покрытий // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №3 (21). Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 15.06.2017).
14. Семенычев В.В., Салахова Р.К. Оценка адгезии никель-кобальтового покрытия к стекло- и углепластику методом царапания // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №7 (43). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-6-6.
15. Семенычев В.В., Салахов Р.К. Склерометрия как метод оценки интенсивности межкристаллитной коррозии // *Коррозия: материалы, защита*. 2015. №12. С. 37–41.
16. Панарин А.В., Семенычев В.В. Оценка триботехнических характеристик карбидохромового покрытия // *Физика и химия обработки материалов*. 2016. №5. С. 65–70.
17. Ильин В.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Петухов В.И., Никитин К.Е. Эффективность современных наукоемких технологий // *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ»: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 413–416.*
18. Benjamin P., Weaver C. Measurement of Adhesion of Thin Films // *Proc. Royal. Society. London*. 1960. P. 163–176.
19. Weaver C. Adhesion of Thin Films // *Vac. Sci. Technol*. 1975. P. 18–25.
20. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.