

На основании вышеописанного метода разработана и изготовлена опытно-промышленная компьютерная установка ИСС 1003М (см. рисунок), являющаяся современным модернизированным вариантом известной установки ИСС 1003.

Установка осуществляет измерение степени ослабления низкоэнергетического рентгеновского излучения контролируемым веществом в двух измерительных каналах, располагаемых соответственно до (канал 1) и после пропитки (канал 2) контролируемого материала, вычисление массового процентного содержания связующего по формуле (1) и вывод измеряемого значения в цифровой и графической форме на дисплей персонального компьютера. Она может работать совместно с внешним управляющим устройством в системах активного контроля процесса пропитки.

Установка предназначена для непрерывного неразрушающего контроля бесконтактным способом массового процентного содержания связующего в угле-, органо- и стеклотканях, а также в бумажных лентах в процессе их пропитки на пропиточных машинах. Она может быть использована также для измерения изменений поверхностной массы тканей, бумаг, древесных плит и т. п. в процессе их производства.

Отличительной особенностью установки ИСС 1003М является использование радиоканала, что позволило отказаться от длинных соединительных высоковольтных кабелей и существенно повысило уровень надежности и пожаробезопасности установки.

Установка ИСС 1003М хорошо зарекомендовала себя в производственных условиях. Как показало практическое использование, среднеквадратическая погрешность измерения массового процентного содержания связующего составила не более  $\pm 1\%$  в диапазоне от 0 до 75%, что позволило рекомендовать установку ИСС 1003М в качестве средства контроля процессов пропитки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shen Yi, Wang Yan, Liu Zhiyan, Zhang Jian Qiu. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE, Issue, 18–21 May. 1998. V. 2. P. 1071–1073.
2. Huang Y.D., Sun Y.F., Liu L. //Materials Science and Technology. 2003. V. 19. №6. P. 815–818(4).
3. Никитин К.Е. //Заводская лаборатория. 1993. №3. С. 31–34.

*В.И. Постнов, О.Г. Сенаторова, С.А. Каримова,  
Т.Г. Павловская, Г.Ф. Железина, И.А. Казаков,  
П.А. Абрамов, М.В. Постнова, О.Е. Котов*

#### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КМ, ИХ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА**

*Изучены особенности формования крупногабаритных листов МПКМ, включая подготовку поверхности листов алюминиевых сплавов, режимы формования в автоклавах, структурные изменения на границах раздела металла и КМ, распределение остаточных напряжений и приемы их изменения в процессе формования и после формования, а также влияние на механические свойства и усталостную долговечность. Проведены испытания коррозионной стойкости листов и склонности к растрескиванию пленок сернокислотного и хромовокислотного анодирования при деформировании.*

**Ключевые слова:** металлополимерные композиционные материалы, формование крупногабаритных листов.

Наиболее широкое применение МПКМ – АЛОРов и СИАЛов – планируется в обшивочных конструкциях фюзеляжа и крыла ЛА. Поэтому габариты листов ( $L \times B$ )

должны быть в пределах  $(3,0-7,0) \times (1,2-1,5)$  м, а толщина  $h=1-2$  мм. Использование тонких составных слоев МПКМ с большими габаритами требует в серийном производстве особых подходов. На стадии подготовки алюминиевых слоев (транспортировка, обезжиривание, анодирование) возникают дефекты в виде местных «заломов», царапин, загибов, которые не устраняются в процессе формования листов МПКМ и могут повлиять на их механические характеристики.

Для исключения «заломов» (местных выступов и впадин поверхности), особенно вероятных при транспортировке листов, поступающих с металлургических предприятий, габаритами  $1,2 \times 3,0$  и  $1,5 \times 5,0$  м применяется скатывание отдельного листа из плосколежащей стопы в рулон.

В процессе сборки пакетов слоев и их транспортировки в автоклав также возможны смещения слоев друг относительно друга и искривление армирующих волокон по поверхности, что также ведет к снижению свойств материала. Использование специальных прижимов на формующей поверхности оснастки позволяет устранить данные дефекты в листах МПКМ и производить одновременное вакуум-автоклавное формование до десяти листов, что резко снижает материальные и энергетические затраты на единицу выпускаемой продукции.

Перед склейкой материала АЛОР Д16/41 алюминиевые листы Д16ч.-АТВ подвергаются анодированию. В процессе анодирования крупногабаритных листов Д16ч.-АТВ (толщиной 0,6 мм) в ваннах отключается барботаж, чтобы избежать появления заломов и разрушения анодного слоя в перекрываемых соседними листами зонах. Для анодирования алюминиевых листов Д16ч.-АТВ используют серноокислотные и хромовоокисные покрытия.

Серноокислотные анодноокисные покрытия хорошо защищают алюминиевый сплав от коррозии, но при толщине 7–12 мкм не обладают достаточной прочностью. Для реализации преимуществ обоих типов оксидных пленок используется технология, позволяющая получить из серноокислотного электролита оксидные пленки толщиной 5–6 мкм с повышенной прочностью [1]. Серноокислотные оксидные пленки, полученные по этой технологии, в течение длительного времени обеспечивают хорошую коррозионную защиту слоев металла и высокую стабильность свойств АЛОРа при действии коррозионно-активных сред. Пленки, получаемые этим методом, обладают большой твердостью и хрупкостью, из-за чего при деформировании деталей (клепке, резке), а также при нагревании растрескиваются с образованием тончайшей сетки. Пленки, получаемые при хромовоокислом анодировании, обычно имеют толщину порядка 3 мкм и обладают меньшей твердостью, чем пленка, полученная в серноокислом электролите [2]. Кроме того, образцы, подвергнутые хромовоокислому анодированию, имеют прочность клеевого соединения на 15–30% выше, чем прочность образцов, подвергнутых серноокислому анодированию: характер разрушения в основном когезионный. Разрушение образцов с серноокислым анодированием носит адгезионный характер с отрывом анодной пленки по линии металл–анодная пленка. При эксплуатации самолетов процессы, приводящие к ухудшению свойств АЛОРов в неблагоприятных условиях, условно можно разделить на следующие группы: нарушение адгезионных связей между слоями металла и органопластика, термовлажностное старение слоев органопластика, коррозия алюминиевого сплава [3]. Стабильность свойств АЛОРов в процессе эксплуатации в наибольшей степени определяется стойкостью адгезионного соединения алюминиевый

сплав–органопластик, которое, в свою очередь, зависит от способа подготовки поверхности. В табл. 1 приведены результаты исследования влияния режима анодирования листов Д16ч.-АТВ на прочность при межслойном сдвиге.

Таблица 1

**Влияние режимов анодного оксидирования алюминиевого сплава в различных электролитах на прочность АЛОРов при межслойном сдвиге**

Анодное окисление	Режим	Прочность* при межслойном сдвиге, МПа		
		в исходном состоянии	после выдержки в 3%-ном растворе NaCl при 60°С в течение	
			15 сут	45 сут
Хромовокислотное	$T=39^{\circ}\text{C}$ , $t=60$ мин	$\frac{21,0-23,9}{22,6}$	$\frac{20,4-20,9}{20,7}$	$\frac{18,8-20,9}{20,8}$
Сернокислотное	$T=18^{\circ}\text{C}$ , $t=40$ мин	$\frac{21,4-22,0}{21,7}$	$\frac{17,2-22,5}{20}$	$\frac{17,1-18,5}{17,5}$

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

После воздействия коррозионно-активной среды характер разрушения и прочность соединения органопластик–металл в АЛОРе существенно зависят от способа подготовки поверхности листа алюминиевого сплава. Наибольшей стабильностью отличаются образцы АЛОРа, изготовленные с использованием хромовокислотного электролита.

На рис. 1 варианты I, II, III, IV относятся к трехслойным МПКМ (2 слоя металла и 1 слой органопластика), а V и VI – к пятислойным МПКМ (3 слоя металла и 2 слоя органопластика).

Число слоев клея ВК-41 и органоткани СВМ (арт. 56313) определяет только степень армирования органопластика и в целом – физико-механические свойства МПКМ.

Готовый к формованию пакет (пакеты) АЛОР Д16/41 закрываются дренажными слоями стеклоткани Т13 (2–6 слоев) и вакуумным мешком (рис. 2). Указанное выше относится к пакетам АЛОР Д16/41 шириной до 1,5 м, укладываемым в ширину полосы ткани СВМ. Перед формованием вакуумный мешок подсоединяют к вакуумной системе и проверяют на герметичность. Так как формование листов МПКМ ведется при высоком давлении – до 1,2–1,4 МПа, то падение давления в вакуумной системе должно составлять не более 0,005 МПа за 20 мин.

Операция вакуумирования технологического пакета слоев на выклеочной оснастке при автоклавном формовании крупногабаритных листов АЛОР Д16/41 необходима для постоянного удаления воздуха и выделяющихся летучих веществ из межслойного пространства выложенных слоев при предварительном их уплотнении. Особенно необходимо вакуумирование на начальной стадии автоклавного формования при подъеме температуры до 80–100°С в период наиболее интенсивного выделения летучих веществ. При отсутствии эффективного вакуумирования качество и механические свойства материала в изделии снижаются.

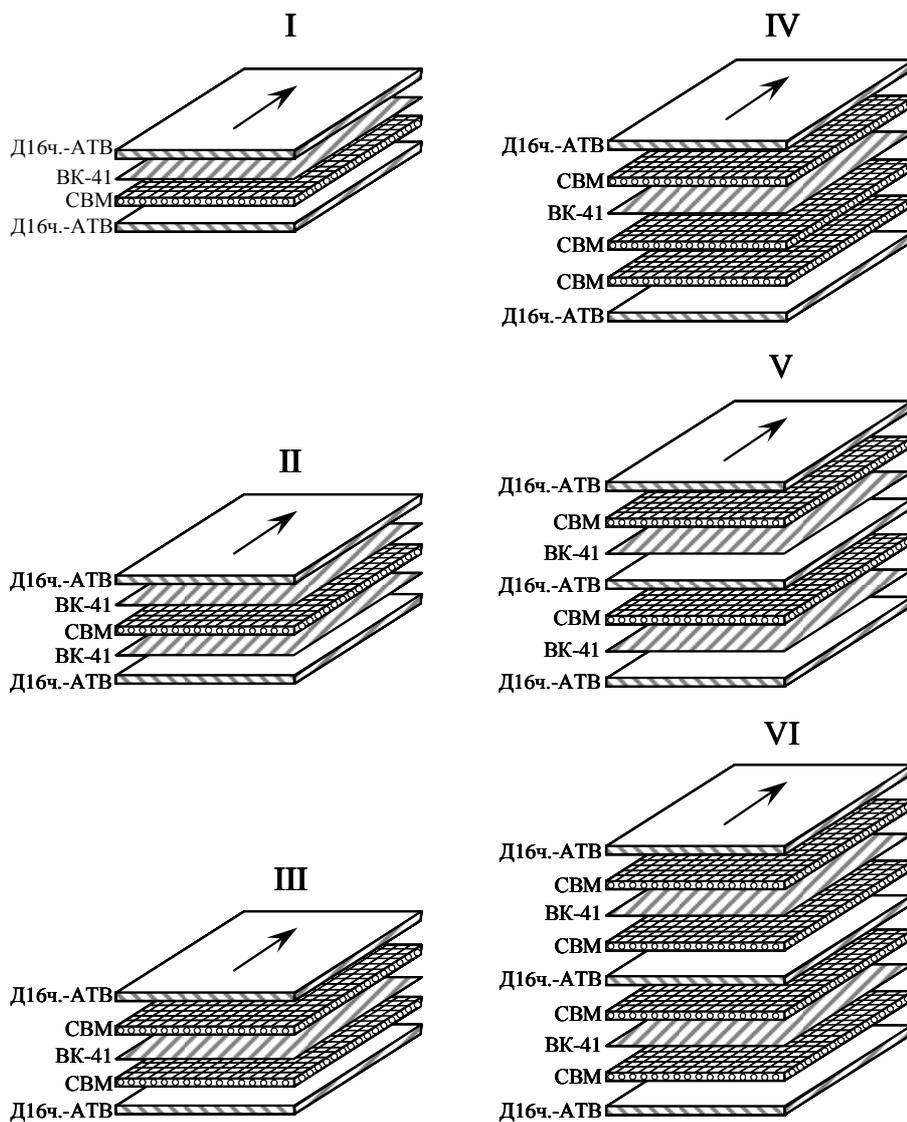


Рис. 1. Схемы сборки пакета слоев материала АЛОР Д16/41:  
I-VI – варианты сборки

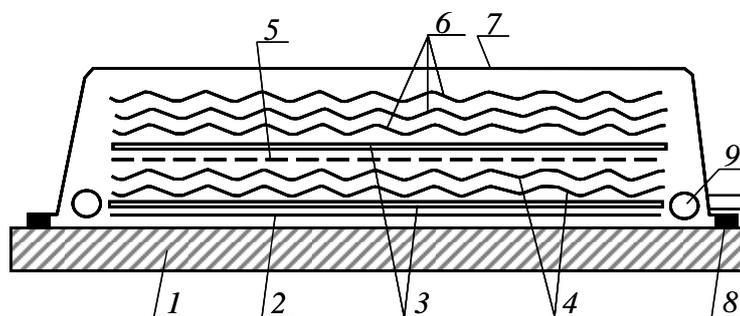


Рис. 2. Схема технологического пакета для вакуум-автоклавного формования:  
1 – выклеивная оснастка; 2 – полипропиленовая пленка; 3 – металлические слои; 4 – ткань СВМ; 5 – клей ВК-41; 6 – дренажная ткань; 7 – пленка ППНТ (вакуумный мешок); 8 – герметизирующий жгут; 9 – трубы вакуумной системы

В процессе отверждения полимерное связующее претерпевает несколько структурных превращений (жидкое, вязкоупругое) до образования твердой структуры. Разработанный прибор ИПФ-2002, с помощью которого был выбран оптимальный температурно-временной режим отверждения слоев КМ и склеивания их с металлическими листами, позволяет учитывать все особенности структурных превращений полимерной матрицы.

Автоклавное формование листов МПКМ при выбранном технологическом режиме позволило получить хорошее качество и небольшой разброс по толщине, однако дефекты в виде заломов в исходных металлических листах Д16ч.-АТВ остаются в листах АЛОРа Д16/41.

Для замера толщин крупногабаритных листов используется специальное устройство, включающее в себя: корпус сварочной точечной машины типа МТК-8004У4, имеющей форму скобы с вылетом 1,0 м; измерительное приспособление, закрепленное на электродах машины, состоящее из индикатора часового типа и нижней опоры с вращающимся шаром. Такое устройство позволило с высокой точностью (до  $1 \cdot 10^{-2}$  мм) производить замер толщины листов с габаритами 6,0×1,5 м.

Анализ результатов замеров толщин крупногабаритных листов АЛОРа Д16/41 показывает, что разнотолщинность в основном получается вследствие таких дефектов, как заломы на алюминиевых листах, образованные в процессе погрузо-разгрузочных работ, при транспортировке и анодировании. Устранение их позволяет стабилизировать толщину листа и свойства крупногабаритных листов АЛОРа Д16/41.

Анализ полученных результатов показывает, что на модуль упругости сильное влияние оказывает толщина слоя органита, причем в пятислойном АЛОРе эта величина почти вдвое больше, чем в трехслойном. Величина декремента  $\eta$  отражает потери энергии при колебаниях и определяется в основном качеством склейки и свойствами органита, поскольку для пластин Д16 значение  $\eta \approx 0,0005$ . По  $\eta$  можно косвенно оценивать качество склейки в различных образцах АЛОРа. Так, можно отметить, что образцы с хромовокислотным анодированием по качеству склеивания выше, чем образцы с серноокислотным анодированием, так как в последнем случае  $\eta$  в среднем на 50% выше, что говорит о большем количестве энергии, рассеиваемой в образце.

При формовании листов АЛОРа Д16/41 шириной более 1,5 м, не укладывающейся в ширину полосы ткани СВМ, необходимо осуществлять стыковку двух полос ткани. Разработка принципов и уточнение технологических параметров для стыковки слоев ткани производилась в двух направлениях: соединение встык и внахлест. Были рассмотрены пять вариантов соединения слоев СВМ в слоях композита по ширине листа (рис. 3).

С целью определения лучшего варианта стыка тканей СВМ по прочностным показателям, характеристике малоциклового усталости и по меньшей трудоемкости были изготовлены и испытаны образцы из трех партий листов АЛОРа Д16/41 габаритами 1,2×3,0 м. Так как в направлении основы свойства материала АЛОРа Д16/41 выше, чем в поперечном направлении, то было выбрано наихудшее направление вырезки образцов – направление утка. Большее количество образцов было вырезано поперек стыка, и после испытаний образцов основной упор делался на результаты испытаний в направлении утка. Для сравнения результатов испытаний, кроме образцов, вырезанных из зон стыка (5 вариантов), были вырезаны образцы из листа АЛОРа Д16/41 вне зоны стыка.

При выполнении стыков ткани СВМ согласно вариантам I и III (см. рис. 3) возросла трудоемкость работ в связи с подготовкой ткани к стыкованию: кромки тканей СВМ приходилось предварительно срезать, продергивать нить основы на 20 мм. Высока трудоемкость применения и варианта II – необходимо сшить кромки тканей СВМ, накладывая одну кромку на другую, а затем в середину нахлеста тканей проложить полосу клея ВК-41 шириной 10 мм.

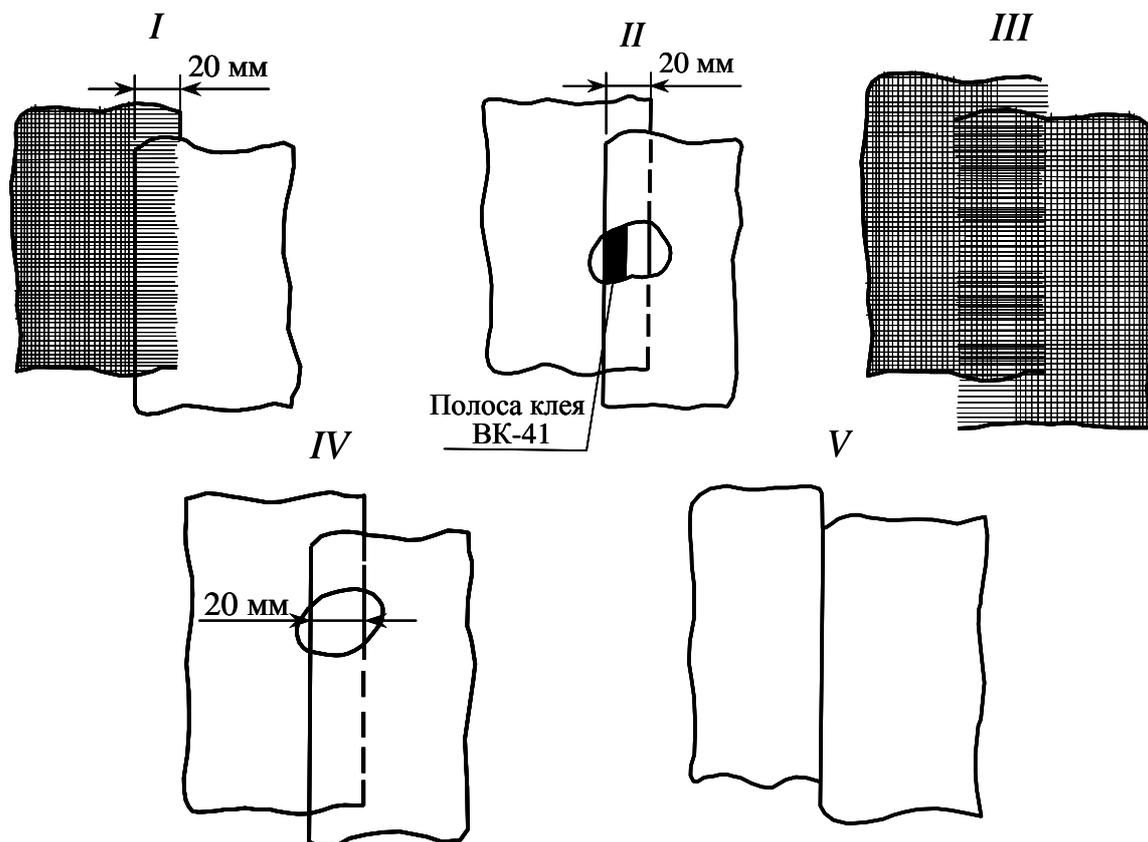


Рис. 3. Варианты соединения слоев СВМ в крупногабаритных листах АЛОРа:

*I* – соединение внахлест: распущенный конец СВМ + целая кромка; *II* – соединение внахлест: две ткани СВМ, предварительно прошитые + наложение клеевой полосы; *III* – два куса ткани СВМ внахлест стыкуются распущенными концами; *IV* – две ткани СВМ с целыми кромками соединяются внахлест; *V* – две ткани СВМ целыми концами соединяются встык

С целью определения лучшего варианта стыка тканей СВМ по ширине листа АЛОРа Д16/41 проведены механические и усталостные испытания с определением  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ , МЦУ,  $E$ . Испытания на малоцикловую усталость проводились на испытательной машине EUS-40 при частоте  $f=5,7$  Гц,  $\sigma_{\min}=8-10$  МПа,  $\sigma_{\max}=150$  МПа.

В результате проведенных испытаний на МЦУ можно выделить следующие варианты стыка ткани СВМ:

- вариант *IV* – среднее количество циклов до разрушения  $N=88200$ ;
- вариант *III* – среднее количество циклов до разрушения  $N=83466$ .

Испытание материала АЛОРа Д16/41 на прочность при растяжении и сдвиге выявило преимущество варианта *III* ( $\sigma_b=431$  МПа,  $\sigma_{0,2}=264$  МПа,  $\tau_{сдв}=25,5$  МПа) и варианта *IV* ( $\sigma_b=431$  МПа,  $\sigma_{0,2}=257$  МПа,  $\tau_{сдв}=24,1$  МПа). Измерения модуля упругости АЛОРа Д16/41 вне зоны стыка показали, что  $E=59978$  МПа.

На основе анализа результатов испытаний можно сделать следующие выводы:

- стык ткани должен осуществляться только внахлест;
- ширина нахлеста ограничивается 20 мм;
- стыковку тканей внахлест следует осуществлять по *III* или *IV* варианту.

Наименьшим по трудоемкости вариантом стыковки является *IV* с целыми, не распущенными кромками. При этом ширина стыкуемых полос выбирается так, чтобы при резке полос СВМ отходы были минимальны, и в слоях стыки разносились по ширине листа металла. Замеры толщины образцов, вырезанных из материала АЛОРа Д16/41 в местах стыка и вне этой зоны, приведены в табл. 2.

Толщины листов АЛОР Д16/41

Вариант стыка (см. рис. 3)	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	Вне зоны стыка (лист)
Толщина $h_{ср}$ , мм	1,35	1,4	1,37	1,36	1,35	1,25

Замеры толщин листов АЛОР Д16/41 в местах стыка ткани СВМ и вне зоны стыка выявили преимущество вариантов *III* и *IV*. При их использовании толщина в районе стыка находится в пределах допуска и не портит товарный вид листов АЛОР Д16/41. В результате проведенных исследований по пакетному изготовлению листов МПКМ можно сделать вывод, что формование в автоклаве листов АЛОР Д16/41 со стыками тканей СВМ по ширине листа возможно – без отклонений по качеству склейки – при наборе в одном пакете 5–7 листов.

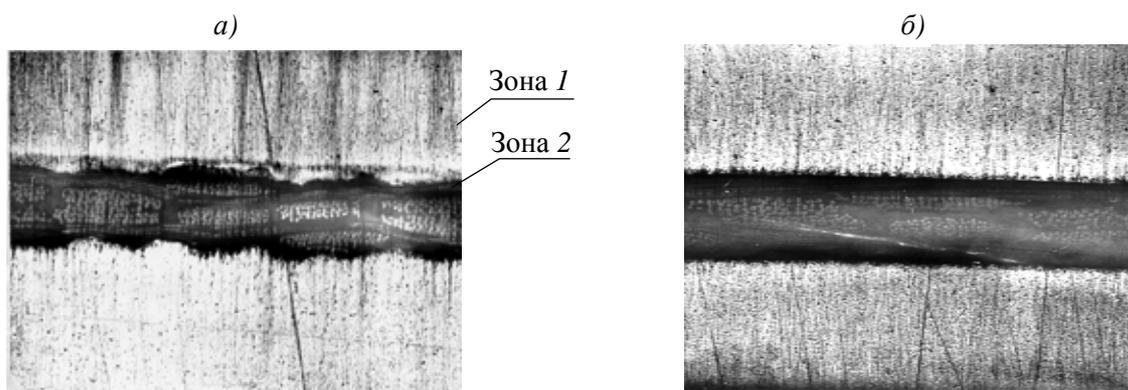


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 63$ ) образца АЛОР:  
*a* – участок с волнообразными складками; *б* – прямолинейный участок

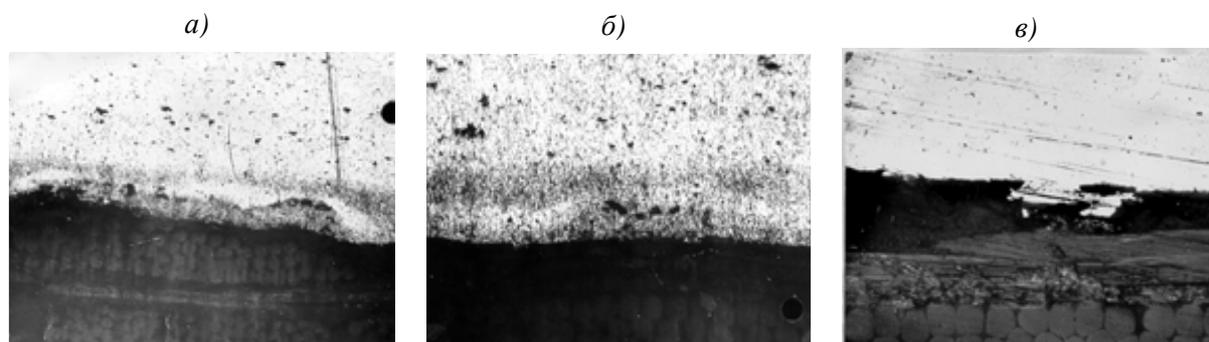


Рис. 5. Микроструктура АЛОР в зоне *I* (см. рис. 4):  
*a, б* – частицы анодного покрытия в плакирующем слое (*a* –  $\times 320$ ; *б* –  $\times 500$ );  
*в* – плакирующий слой и анодное покрытие в несплошностях ( $\times 500$ )

Микроструктурный анализ проводили на шлифах, вырезанных из различных зон листа АЛОР Д16/41. Оценка структуры АЛОР Д16/41 проводилась оптическим методом на микроскопе НЕОФОТ-31 с применением светлого, темного полей, в поляризованном свете. Замер микротвердости в слоях МПКМ производился на приборе ПМТ-3. В ходе исследований установлено [4], что в сечении с максимальными значениями напряжений в зоне сопряжения металл–органопластик наблюдаются ровные участки и участки с волнообразными складками (рис. 4). Анодный слой на листе Д16ч.-Т разрушен (рис. 4, *a*), причем разрушение более интенсивное в зоне *I*. На волнообразных участках зоны *I* частицы твердого серноокислого анодного покрытия ( $H_{\mu 50}=3000$  МПа) за-

тянуты в мягкий лакирующий слой ( $H_{\mu 20}=600$  МПа) (рис. 5). На прямолинейных участках лакирующий слой и разрушившееся анодное покрытие запрессованы в несплошности матрицы органопластика (рис. 6, *а*). В зоне 2 (см. рис. 4) – сопряжение по прямым и волнообразным участкам – имеет место разрушение анодного покрытия с незначительным сдвигом его (запрессовкой) в матрицу органопластика на глубину 5–8 мкм (см. рис. 5). Внутризеренный сдвиговый микрорельеф наблюдается в виде множественного скольжения по более светлым зернам, судя по характеру микрорельефа в непосредственной близости от границы раздела и по высоте слоев металла в обеих зонах, деформация распределялась относительно равномерно. Однако на участках с волнообразными складками количество сдвиговых плоскостей больше, чем на прямолинейных участках (рис. 6–8).

На рис. 7, *в* сдвиговые плоскости указаны стрелками, зерно равноосное, интерметаллиды вытянуты в направлении прокатки.

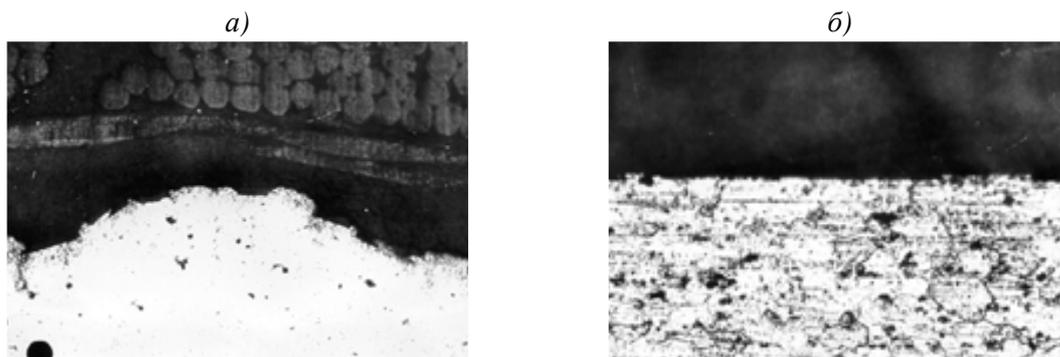


Рис. 6. Разрушение анодного покрытия алюминиевого листа АЛОР:  
*а* – на участке «смятия», зона 1 (см. рис. 4),  $\times 500$ ; *б* – на прямолинейном участке, зона 2 (см. рис. 4),  $\times 320$

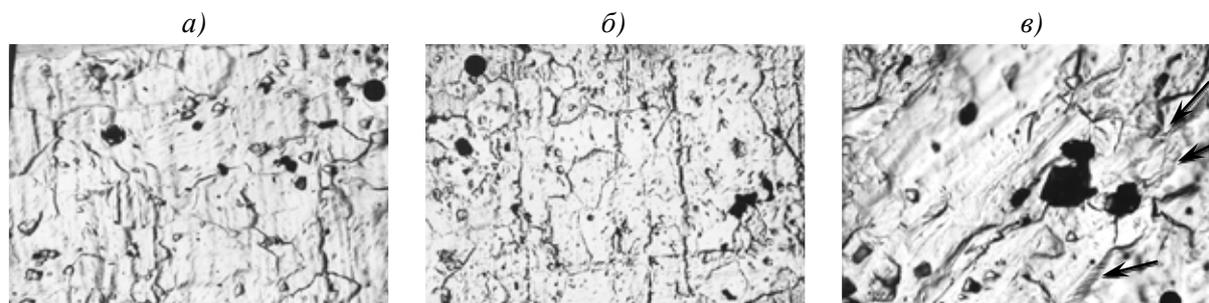


Рис. 7. Внутризеренный микрорельеф в материале АЛОР:  
*а* – у поверхности образца над участком смятия ( $\times 1000$ ); *б* – по сечению листа над участком смятия ( $\times 630$ ); *в* – по границе сопряжения над участком смятия (стрелками показаны сдвиговые плоскости),  $\times 1250$

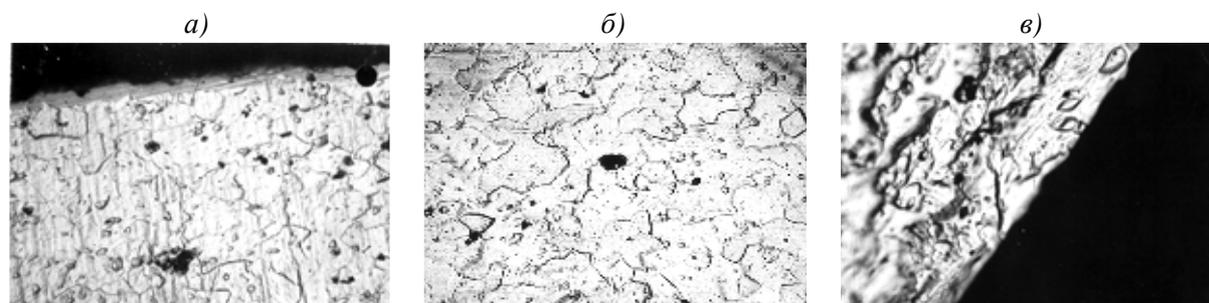


Рис. 8. Внутризеренный микрорельеф в материале АЛОР:  
*а* – у поверхности листа над прямолинейным участком ( $\times 60$ ); *б* – по сечению листа над прямолинейным участком ( $\times 630$ ); *в* – по границе сопряжения над прямолинейным участком ( $\times 1250$ )

Микротвердость по светлым и темным зернам одинакова и составляет  $H_{\mu 20}=1380$  МПа (рис. 9).

При исследовании поверхности образцов с анодным и частично снятым анодным слоем обнаружены полосы с искривленными линиями скольжения, которые начинаются от продольных деформированных зон. В отдельных местах по линиям скольжения наблюдаются трещины по анодному слою. При травлении образцов, по трещинам идет более интенсивное травление с образованием текстурного рельефа в плакирующем слое.

При изучении образца *II* (см. рис. 3) с минимальными значениями напряжений в сечении видно, что зоны сопряжения *1* и *2* (см. рис. 4) прямолинейны (рис. 10). Со стороны зоны *1* имеет место частичное разрушение сернокислого анодного покрытия с запрессовкой его в матрицу органопластика на глубину 6 мкм. В слое органопластика по границе сопряжения зоны *1* наблюдаются значительные несплошности в виде пор и раковин (см. рис. 10). Однако в зоне *2* разрушения анодного покрытия и дефектов в слое органопластика не наблюдается.

Микротвердость по светлым и темным зернам одинакова и составляет  $H_{\mu 20}=1500$  МПа, что на 10% превышает твердость материала образца *I* (см. рис. 3) – рис. 11.



Рис. 9. Распределение микротвердости (стрелками показаны отпечатки от твердомера) по зернам в материале АЛОП ( $\times 320$ ):

*a* – зона *1* (см. рис. 4); *б* – зона *2* (см. рис. 4)

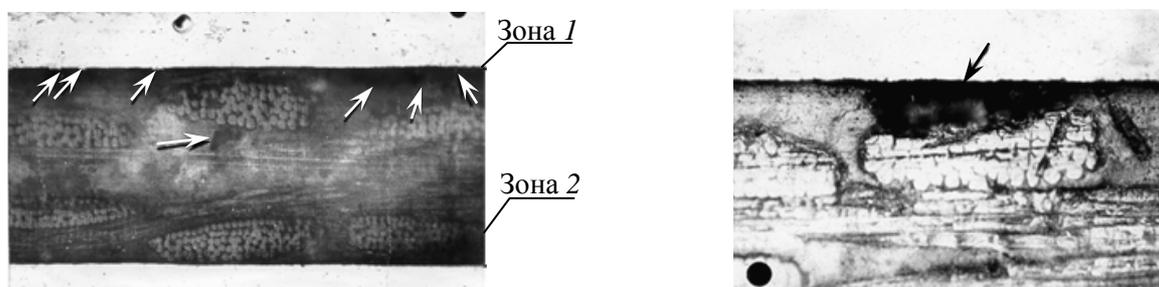


Рис. 10. Зоны сопряжения металл–органопластик ( $\times 200$ ) в материале АЛОП (вариант *II* – см. рис. 3); стрелками указаны зоны с порами в матрице

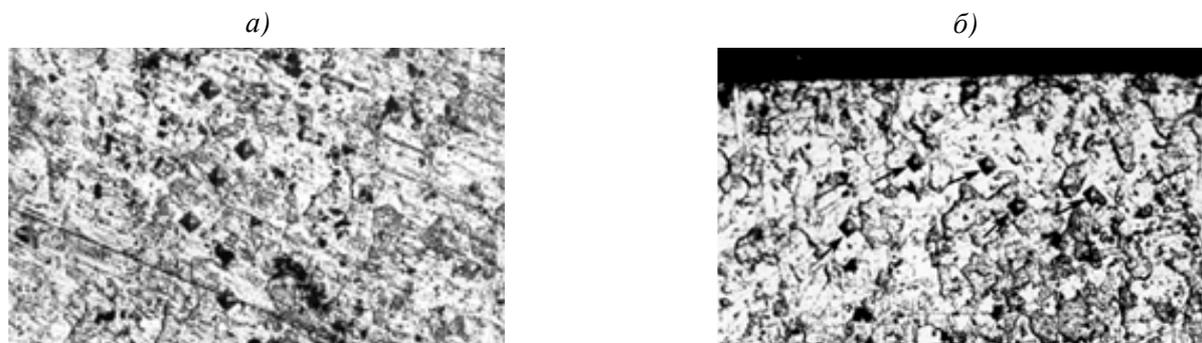


Рис. 11. Распределение микротвердости ( $\times 320$ ) по «светлым» и «темным» зернам в материале АЛОП (вариант *I* – см. рис. 3):

*a* – зона *1*; *б* – зона *2* (см. рис. 4)

Из приведенных структур образцов *I* и *II* (см. рис. 3) видно, что причиной образования смятия в зоне соединения металл–органопластик образца *I* могло послужить нарушение температурного режима формования АЛОРа из-за большого температурного градиента вследствие неравномерности прогрева оснастки и листов МПКМ, что привело к неравномерной деформации из-за разницы в коэффициенте температурного расширения граничных слоев, к разрушению хрупкого анодного покрытия и «запрессовке» его в матрицу органопластика. Неравномерная деформация по сечению образца (в зоне смятия) могла возникнуть также и вследствие неравномерно распределенной нагрузки на слои АЛОРа от избыточного давления в автоклаве и течения вязкого связующего ВК-41.

Таким образом, микроструктурный анализ показал, что деформация алюминиевых слоев может повлиять на остаточные напряжения в листах МПКМ, которые (напряжения) могут быть связаны с разрушениями в процессе эксплуатации конструктивных элементов из таких листов.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что

- транспортировка крупногабаритных листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТВ (толщиной 3–6 мм) может проводиться в виде рулонов диаметром 0,8–1,0 м или в специализированных устройствах;
- хромовокислородное анодирование листов Д16ч.-АТВ предпочтительнее, чем сернокислородное;
- изготовление широких листов МПКМ возможно со стыковкой армирующих тканей внахлест.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Железина Г.Ф. Трещиностойкие металлоорганопластики для авиационных конструкций: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: ВИАМ 1996. 15 с.
2. Крысин В.Н. Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. М.: Машиностроение. 1980. 220 с.
3. Постнова М.В. Исследование влияния вида анодного покрытия на эксплуатационные характеристики МПКМ //XXVI Гагаринские чтения: тез. докл. Международной молодежной науч. конф. М: МАТИ. 2000. 164 с.
4. Постнова М.В., Постнов В.И. Структурные особенности АЛОРа Д16/41 в крупногабаритных листах /Новые материалы и технологии (НМТ-2000): тез. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. М.: МАТИ. 2000. С. 101–102.