

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕЖИМОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Известные методы формообразования конструкционных сплавов в холодном состоянии методом многоударной выколотки приводят к появлению недопустимого коробления и монтажных напряжений, что оказывает заметное влияние на усталостную долговечность элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА).*

*Ключевые слова: деформирование, формообразование, прочность, долговечность, коррозия.*

В настоящее время в авиастроении ведутся исследования по практической отработке концепции и обоснованию возможности использования явления ползучести для изготовления криволинейных панелей обшивки и деталей каркаса планера летательных аппаратов (ЛА) с обеспечением технологичности, конструктивной прочности и долговечности изделий. Использование этого реологического явления при формообразовании деталей обеспечивает значительное сокращение технологического цикла и трудоемкости изготовления элементов авиационных конструкций, повышение точности выполнения аэродинамических обводов при сборке, снижение объема подгоночных работ и уровня монтажных напряжений.

Опыт разработки технологии формообразования монолитных панелей в режиме ползучести и результаты исследований показали, что для многих традиционных алюминиевых сплавов (например, АК4-1, В95) процесс деформирования можно успешно совместить с режимом искусственного старения, без оказания существенного влияния параметров температурно-силового воздействия на требуемые конечные прочностные характеристики и коррозионные свойства.

Известно, что влияние предварительного деформирования на прочностные характеристики сплавов определяется большим числом факторов. Это длительность действия и величина повышенной температуры, уровень статической нагрузки, степень остаточной деформации, которые приводят к изменению механических характеристик, трансформации структуры, обусловленной старением материала. Кроме того, есть основания ожидать, что в определенном диапазоне параметров (при определенных условиях) процесса формообразования деформирование упрочняет материал [1].

В результате исследований автором выявлено влияние параметров процесса формообразования, основанного на пластической деформации при определенной схеме нагружения, на прочностные характеристики и коррозионные свойства деталей из алюминиевых сплавов, которые отражают эффекты, вызванные формоизменением с остаточной деформацией заготовок, не превышающей 1,5 % и характерной для большинства крупногабаритных фрезерованных панелей крыла и панелей фюзеляжа планера ЛА. Полученные данные о статической прочности образцов, изготовленных из фрезерованных заготовок плиты сплавов В95пчТ2 и В95пчТ3, в исходном состоянии

(вариант 1), деформированных по традиционной технологии (вариант 2) и деформированных в режиме ползучести (вариант 3) приведены в таблице. Видно, что по сравнению со сплавом В95пчТ3 большую чувствительность к деформированию показал сплав В95пчТ2.

Следует отметить, что сплав В95пчТ2 после деформирования в режиме ползучести (при температуре 180 °С) имеет показатели прочности близкие к показателям исходного полуфабриката сплава В95пчТ3. При этом формообразование в режиме ползучести для сплава В95пчТ3 не оказало влияния на значения условного предела прочности и условного предела текучести, а также на сопротивление усталости ( $\sigma_{\max} = 160$  МПа;  $R = 0,1$ ;  $f = 20$  Гц), по сравнению с подобными характеристиками исходного полуфабриката (рис. 1).

Результаты усталостных испытаний образцов с центральным круглым отверстием ( $K_t = 2,6$ ) из плиты и листа сплава В95пчТ2 представлены на рис. 2, 3. Кривые усталости для трех уровней циклического нагружения  $\sigma_{\max} = 200, 180, 160$  МПа при коэффициенте асимметрии цикла  $R = 0,1$  и частоте циклического нагружения  $f = 20$  Гц построены по средним логарифмическим значениям выборок. Установлено, что формообразование сплава в режиме ползучести практически не влияет на сопротивление усталости образцов на исследуемых уровнях циклического нагружения в сравнении с исходным состоянием. Подобный характер влияния технологических обработок на характеристики сопротивления развитию трещин усталостных (СРТУ) выявлен при осевом циклическом нагружении образцов с центральной трещиной (рабочее сечение  $3,5 \times 60$  мм) из плиты сплава В95пчТ2, с частотой 5 Гц и коэффициентом асимметрии  $R = 0,1$  при постоянной нагрузке для всех серий образцов.

На усредненных кинетических диаграммах (рис. 4) представлены зависимости скорости  $\Delta 2l/\Delta N$  роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  в вершине усталостной трещины. Полученные данные показывают, что деформирование плиты сплава В95пчТ2 ( $\varepsilon = 0,2$  %) в режиме ползучести (кривая 3) не оказывает, в сравнении с исходным полуфабрикатом (кривая 1), значимого влияния на рост трещин на всех стадиях их развития. Несколько быстрее (в 1,3 раза, средний диапазон диаграммы) развиваются трещины в образцах, прошедших формование многоударной выколоткой (кривая 2).

Статическая прочность образцов, изготовленных из фрезерованных заготовок, деформированных при различных режимах формообразования

№ варианта обработки образца	Обработка образцов	Статическая прочность при растяжении $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$					
		В95пчТ2, плита толщиной 40 мм			В95пчТ3, плита толщиной 40 мм		
		Толщина образцов 3,5 мм			Толщина образцов 2,0 мм		
		$\varepsilon = 0,2 \%$			$\varepsilon = 1,0 \%$		
	$\sigma_{B_0}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_{B_0}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	
1	Исходное состояние	552	474	8,4	519	44	7,9
2	Деформирование многоударной выколоткой при нагреве 150 °С	511	454	9,0	517	453	7,7
3	Деформирование в режиме ползучести методом заневоливания при температуре 180 °С в течение 45 мин	514	434	8,5	517	452	6,5

Примечание:  $l_0$  – длина рабочей части образца;  $F_0$  – площадь расчетного сечения образца.

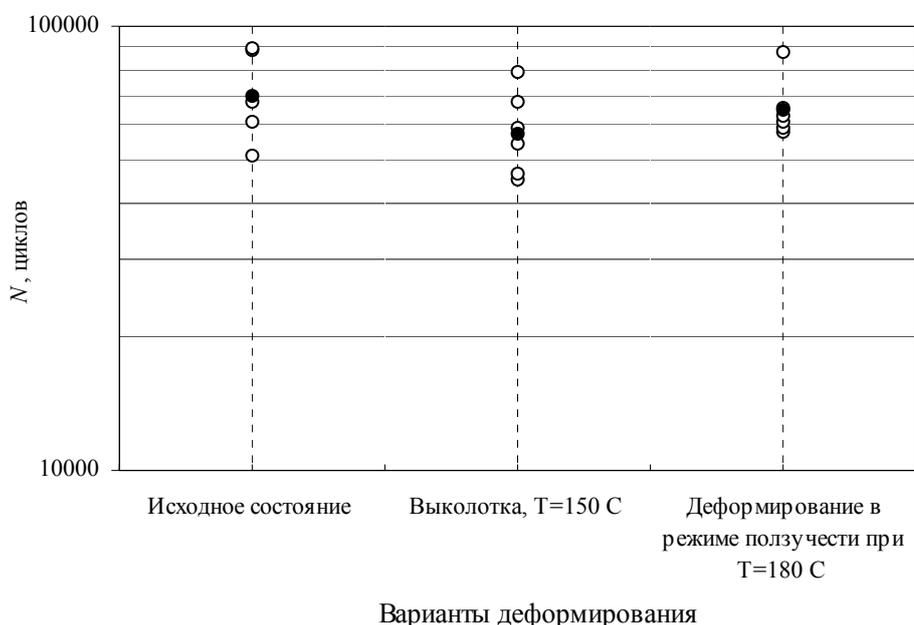


Рис. 1. Усталостная долговечность образцов с отверстием ( $K_t = 2,6$ ), изготовленных из заготовок сплава В95пчТ3, деформированных ( $\varepsilon = 1,5 \%$ ) при различных режимах формообразования  $\sigma_{max} = 160$  МПа;  $R = 0,1$ ;  $f = 20$  Гц; по традиционной технологии (O); в режиме ползучести (●)

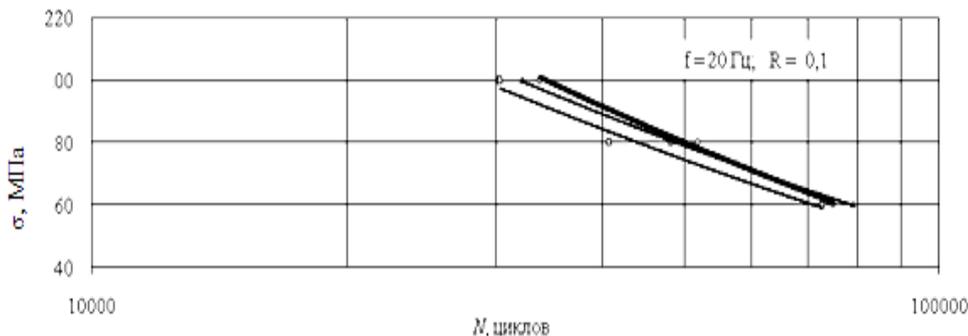


Рис. 2. Усталостная долговечность образцов с отверстием ( $K_t = 2,6$ ), изготовленных из заготовок сплава В95пчТ2 (лист 5,8 мм, вырезка в направлении проката), деформированных ( $\varepsilon = 0,2 \%$ ) при различных режимах формообразования: в исходном состоянии (O); после деформирования многоударной выколоткой (□); после деформирования в режиме ползучести (Δ)

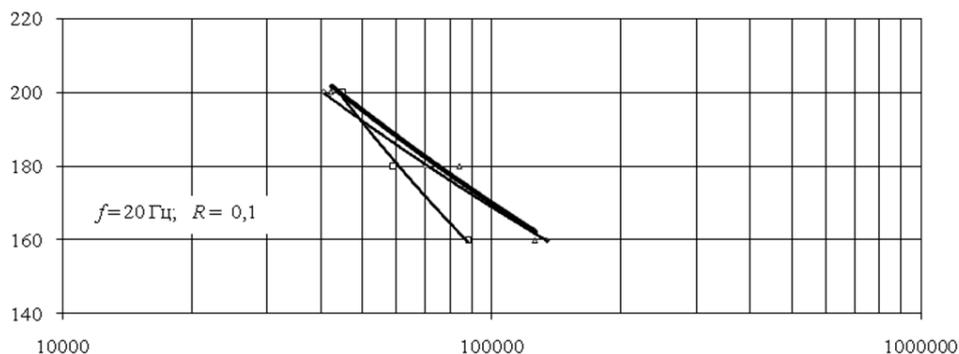


Рис. 3. Усталостная долговечность образцов (рабочее сечение  $3,5 \times 30$  мм) с отверстием ( $K_t = 2,6$ ), изготовленных из заготовок сплава В95пчТ2 (плита, вырезка в направлении проката), деформированных ( $\epsilon = 0,2\%$ ) при различных режимах формообразования: в исходном состоянии (○); после деформирования многоударной выколоткой (◻); после деформирования в режиме ползучести (△)

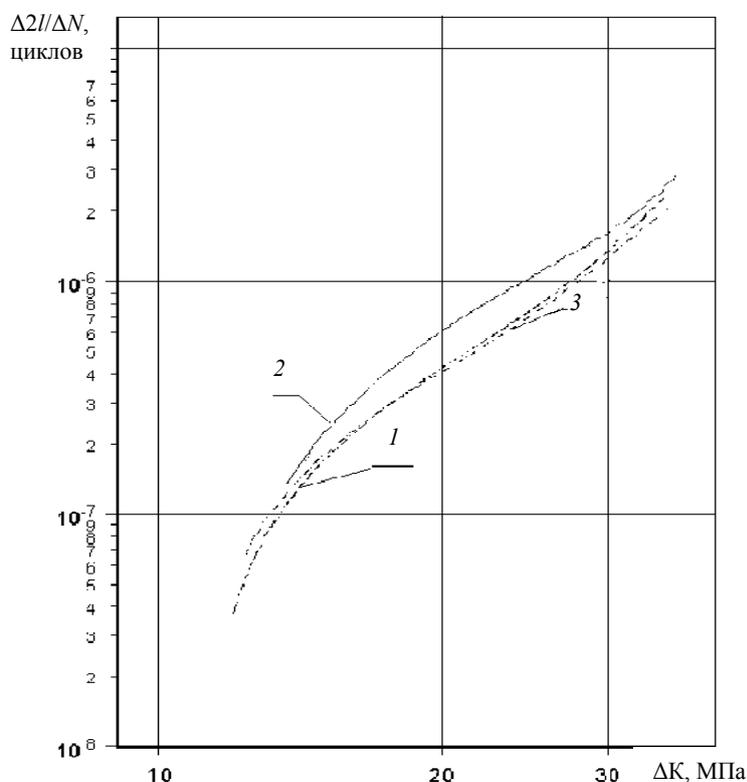


Рис. 4. Зависимость скорости развития трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для плиты сплава В95пчТ2 (сплав В95пчТ2, плита толщиной 40 мм, направление вырезки образца вдоль проката, рабочее сечение образца –  $3,5 \times 60$  мм;  $\sigma_{\max} = 98$  МПа;  $R = 0,1$ ;  $f = 10$  Гц): исходное состояние (1); деформирование многоударной выколоткой при  $T = 150$  °С (2); деформирование в режиме ползучести при  $T = 180$  °С методом заневоливания (3)

Сплав В95пчТ2 демонстрирует повышенную стойкость к коррозионному растрескиванию независимо от варианта обработки: все образцы простояли в стандартном электролите под нагрузкой (при заданном напряжении, равном  $0,75\sigma_{0,2}$ ) (контрольная временная база 90 суток без разрушения (ГОСТ 9.019)).

У образцов после деформирования в режиме ползучести интенсивность поражения местной коррозией значительно ниже. Анализ шлифов образцов сплава В95пчТ2 (всех серий) после испытаний по ГОСТ 9.021

на межкристаллитную коррозию (МКК) показал, что несмотря на внешнее поражение поверхности (потерю блеска, характерную для всех рассмотренных случаев), очагов развития МКК не обнаружено. После стандартных испытаний в течение 7 суток по ГОСТ 9.904 все образцы имеют примерно одинаковую, близкую к третьему баллу, стойкость к расслаивающей коррозии. Аналогичные результаты получены при стандартных испытаниях на межкристаллитную, расслаивающую коррозию и коррозионное растрескивание

для образцов всех исследуемых вариантов формоизменения образцов сплава В95пчТ3 [2].

Деформирование в режиме ползучести оказало существенное влияние на изменение микроструктуры плиты сплава В95пчТ2, в частности, произошло незначительное укрупнение нерастворимых фаз по сравнению с микроструктурой исходного полуфабриката. При деформировании выколоткой отмечено неравномерное дробление зерен, что, по-видимому, обуславливает большее рассеяние экспериментальных данных при испытании образцов на сопротивление развитию трещин усталости.

Следует учитывать, что температура режима искусственного старения (160...180 °С), при которой происходит формообразование, не может обеспечить полной релаксации напряжений, создаваемых в деталях при заневоливании. При этом остаточные напряжения ведут к упругой отдаче (пружинению), которую необходимо учитывать при выборе деформации заневоливания. Можно предположить, что снизить эффект пружинения либо избежать его, но без увеличения допускаемых температур, можно интенсификацией процесса деформирования. Это особенно важно при формообразовании деталей из сплавов 1163, Д16чТ, 2024Т351, применяемых в авиационных конструкциях, как правило, в естественно состаренном состоянии. Формообразование методом заневоливания для этих сплавов возможно только при нормальной температуре. Отсюда, для получения требуемой геометрии, заготовку, с учетом упругой отдачи, необходимо деформировать с большим упреждением, т. е. с большей начальной деформацией. Уменьшение усталостной долговечности после деформирования сплава при исследованных параметрах подтверждает необходимость поиска методов, способствующих

снижению отрицательного влияния деформирования [3].

Нагрев естественно состаренных сплавов инициирует ускоренное старение и, как следствие, изменение механических свойств: снижение сопротивления усталости и характеристик вязкости разрушения. В силу этого, формообразование деталей из таких сплавов требует других подходов и становится необходимым поиск новых режимов, не связанных с нагревом сплавов. Например, реализовать формообразование при нормальной температуре можно за счет интенсификации реологического процесса путем наложения дополнительных силовых полей типа магнитно-импульсного или электрического воздействия на материал, позволяющего за счет кратковременного нагрева обеспечить при определенной схеме нагружения требуемые или приемлемые параметры деформирования и требуемую величину конечной пластической деформации в металлах и сплавах, облегчить релаксацию общих и локальных остаточных напряжений в зонах их опасной концентрации.

Автором была проведена оценка влияния процессов формообразования с использованием импульсного тока на сопротивление усталости конструктивных элементов из сплава Д16чАТ. Представлены зависимости сопротивления усталости конструктивных образцов, деформированных с применением электростимуляции, от длительности воздействия импульса  $\tau$ , совпадающего по направлению с продольной осью заготовок.

Показано, что воздействие импульсного электрического тока перед операцией деформирования сплава Д16чАТ повышает сопротивление усталости (рис. 5) на исследуемых уровнях циклических напряжений по сравнению с усталостной долговечностью подобных образцов в исходном состоянии.

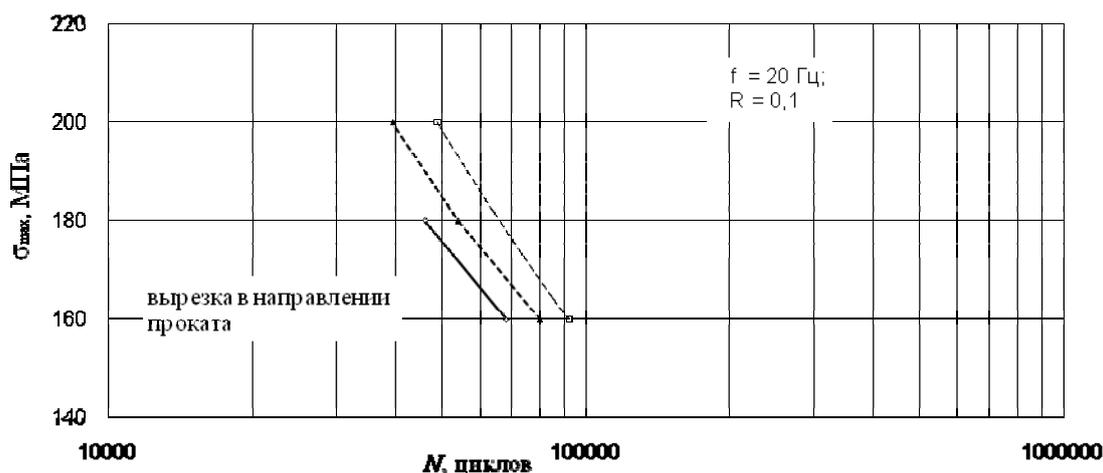


Рис. 5. Усталостная долговечность образцов с отверстием ( $K_t = 2,5$ ), изготовленных из балок (сплав Д16чАТ лист 4,0 мм), деформированных ( $\epsilon = 1,5\%$ ) при нормальной температуре после воздействия импульсного электрического тока: исходное состояние (◇); деформирование после воздействия ИЭТ,  $\tau = 120$  с,  $T = 60$  °С (□); деформирование после воздействия ИЭТ,  $\tau = 30$  с,  $T = 60$  °С (▲)

Так, воздействие импульсного электрического тока (ИЭТ) с длительностью импульса 120 с, направленного вдоль проката, повышает усталостную долговечность образцов на 25 %, а при длительности воздействия импульса 30 с – на 15 % [4].

Таким образом, при исследовании влияния параметров процесса формообразования с остаточной деформацией заготовок, не превышающей 1,5 %, характерной для большинства крупногабаритных фрезерованных панелей крыла и панелей фюзеляжа планера ЛА, на прочностные характеристики и коррозионные свойства деталей из алюминиевых сплавов В95пчТ2, В95пчТ3, Д16чАТ, установлено, что механические свойства сплава В95пчТ2 после деформирования в режиме ползучести (при температуре 180 °С) имеют показатели прочности исходного полуфабриката сплава В95пчТ3.

Показано, что формообразование в режиме ползучести практически не влияет на сопротивление усталости образцов из сплава В95пчТ2 на исследуемых уровнях циклического нагружения в сравнении с исходным состоянием.

Установлено, что у образцов из сплава В95пчТ2 после деформирования в режиме ползучести интенсивность поражения местной коррозией значительно ниже. Сплав В95пчТ2 демонстрирует повышенную стойкость к межкристаллитной, расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию независимо от варианта обработки.

Аналогичные результаты получены при стандартных испытаниях на межкристаллитную коррозию и коррозионное растрескивание для образцов всех

исследуемых вариантов формоизменения образцов сплава В95пчТ3 [5].

Установлено, что воздействие импульсного электрического тока перед операцией деформирования сплава Д16чАТ повышает сопротивление усталости на исследуемых уровнях циклических напряжений в сравнении с усталостной долговечностью подобных образцов в исходном состоянии.

#### Библиографические ссылки

1. Кузнецов А. А., Алифанов О. М., Ветров О. М. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и сортамента. М. : Машиностроение, 1970.
2. Акопян К. Э., Бутушин С. В., Семин А. В. Анализ данных о коррозионном состоянии самолетов типа ТУ-154, базирующихся в различных региональных управлениях гражданской авиации // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 41–49.
3. Туманов А. Т., Квасов Ф. И., Фридляндер И. Н. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов : пер. с англ. М. : Metallurgia, 1972.
4. Бутушин С. В. Анализ живучести материала конструкции планера воздушных судов, имеющих длительную эксплуатационную наработку // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2008. № 130. С. 7–13.
5. Остаточные напряжения в деталях из высокопрочного алюминиевого сплава В95 после различных методов обработки / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, В. И. Змиевский, А. В. Можаяев // Проблемы прочности. 1980. № 8. С. 60–62.

A. V. Katsura

#### ANALYSIS OF EFFECTS OF REGIMES OF FORM COMPOSITION ON STRENGTH AND CORROSIVE PROPERTIES OF ELEMENTS OF ALUMINUM ALLOY BASED STRUCTURES

*All widely known methods of form composition of structural alloys in the cold state via poly-percussive drifting lead to occurrence of intolerable buckling and mounting tensions, which drastically affect the life duration of aircraft structures.*

*Keywords: deformation, form composition, durability, life duration, corrosion.*

© Кацура А. В., 2011