

выглаженных образцов, испытанных при повышенных температурах [для стали ЭИ96Г до 550°C [5] и сплава ЭИ437Б до 700°C (рис.3)], определенную роль играют наведенные остаточные напряжения сжатия.

Полученные аналитические зависимости позволяют рассчитать эти напряжения в зависимости от усилия выглаживания и условий нагрева.

Из приведенных данных можно также заметить, что для более высоких температур эксплуатации следует применять меньшие, для более низких – большие силы выглаживания.

## Л и т е р а т у р а

1. Теоретические основы планирования экспериментальных исследований. Учебное пособие под ред. Т.К. Круга. М., МЭИ, 1973, 179с.

2. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М., "Машиностроение", 1974, 254 с.

3. Мухиян В.С., Саватеев В.Г. Релаксация остаточных напряжений в деталях из стали ЭИ96Г. В сб.: "Вопросы оптимального резания металлов". Труды, вып.34. Уфа, 1972, 255с.

4. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. Куйбышевское книжное изд-во, 1968, 132 с.

5. Егоров В.И., Митряев К.Ф. Влияние алмазного выглаживания на качество поверхности и выносливость жаропрочных материалов при рабочих температурах. В сб.: "Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов". Межвузовский сборник, вып.2, КуАИ, 1974, 192 с.

УДК 621.787.4

К.Ф. Митряев, В.М. Опарин  
М.П. Кривенко

### ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ9 АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ

Одним из методов повышения качества и эксплуатационных свойств высоконагруженных деталей является алмазное выглаживание. Однако при алмазном выглаживании титановых сплавов очень велики силы адгезионного взаимодействия в зоне контакта инструмента с деталью, что выражается в налипании частиц металла на поверхность алмаза

и резком увеличении силы трения. Это делает практически невозможным непосредственное выглаживание титановых сплавов. Применение заменителей алмаза и различных смазок не дало положительных результатов.

В данной статье приводятся результаты исследований выглаживания титановых сплавов через покрытия. Одновременно изучалось влияние алмазного выглаживания на качество поверхности гальванических и химических покрытий.

Образцы для выглаживания изготавливались из титанового сплава BT9. В качестве гальванических покрытий использовались хром, медь, никель, серебро, кадмий, а химических - никель-фосфорное покрытие.

На титановых сплавах сложно получить качественное покрытие. С целью улучшения сцепляемости покрытия с основной детали из титановых сплавов обычно подвергают гидроджетоструйной обработке. Но этот метод подготовки поверхности имеет ряд недостатков: увеличивает высоту микронеровностей исходной поверхности на I-2 класса, приводит к неравномерному ее упрочнению, не исключает шаржирования. С целью устранения этих недостатков нами были исследованы возможности различных травителей. Наилучшие результаты получены при травлении образцов из сплава BT9 в растворе, содержащем 400-600 г/л серной кислоты и 30-50 г/л поваренной соли, при температуре 60-85°C. В этом случае прочность сцепления покрытия с основой не ниже, чем тех же покрытий с пескованной поверхностью. Величина микронеровностей после травления поверхности возрастает незначительно.

Исследование качественных характеристик сплава BT9 проводилось как по покрытию при различных толщинах пленок, так и после снятия покрытия травлением. Опыты показали, чтобы получить качественное покрытие после выглаживания, шероховатость подложки должна быть не ниже 6 класса. Для получения максимального эффекта от выглаживания толщина покрытия должна быть не более 10 мкм. В этом случае лучше проглаживается основа и не происходит отслаивания покрытия.

Нанесение покрытия приводит к повышению шероховатости поверхности до одного-двух классов и тем больше, чем толще слой покрытия и выше плотность тока. Алмазное выглаживание по гальваническому и химическому покрытию при  $P_y = 20-30$  кгс и  $R_{сф} = 1,5-2,5$  мм,

$\xi = 0,03-0,07$  мм/об позволяет снизить шероховатость поверхности покрытия с шестого-седьмого классов до девятого-десятого и получить более равномерный микрорельеф со скругленными впадинами и выступами, с увеличенным шагом неровностей и повышенным коэффициентом опорной линии.

При выглаживании инструментом с кристаллом из естественного алмаза шероховатость несколько меньше, чем при использовании искусственного. Стравливание покрытия после выглаживания показывает, что шероховатость исходной поверхности деформируется, но не полностью. Высота неровностей снижается примерно на один класс, микрорельеф становится более благоприятным (увеличиваются радиусы выступов и впадин). Неполное проглаживание поверхности основы обусловлено тем, что металл покрытия, заполняя впадины микрорельефа и находясь под силовым воздействием, препятствует пластической деформации микровыступов, создавая условия для всестороннего сжатия. Многократное же увеличение давления может вызывать отслаивание покрытия.

Результаты проведенных исследований показали, что выглаживание титановых сплавов возможно через любое из перечисленных покрытий. Однако наибольший эффект получается при выглаживании через мягкие пленки кадмия, меди и серебра. Если покрытие после выглаживания необходимо удалять, выглаживание целесообразно производить через утолщенный (в 3-5 мкм) подслоу никеля, который наносится под любое покрытие. В этом случае устраняется операция стравливания покрытия. Необходимо снять только подслоу.

При выглаживании через покрытие происходит изменение физико-механических свойств титанового сплава в слое толщиной до 100... 200 мкм. Как видно из рис.1, при выглаживании образцов из сплава BT9 через медную пленку, несмотря на его небольшую склонность к упрочнению, микротвердость на поверхности увеличивается на 10-20% в зависимости от усилия. Наклеп охватывает слой металла толщиной в 25-40 мкм. Аналогичные результаты получены при выглаживании через пленку серебра и кадмия. В последнем случае увеличение микротвердости, хотя и небольшое, наблюдалось в слое толщиной до 180 мкм.

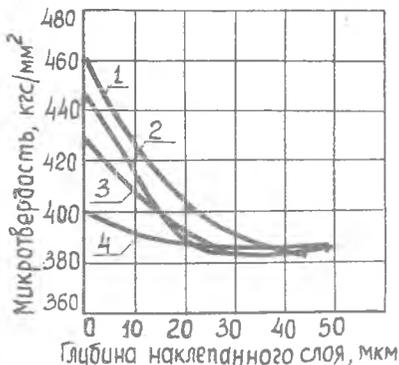
На рис.2 приведены эпюры остаточных напряжений для поверхностных слоев сплава BT9 после шлифования и алмазного выглаживания через кадмиевую пленку. Как видим, после шлифования формируются

напряжения растяжения, а после выглаживания - сжатия. С увеличением силы выглаживания  $P_y$  от 5 до 25 кгс ( см. рис.2) максимум остаточных напряжений

( $\sigma_{\tau} - \mu \sigma_{\sigma}$ ) возрастает от -40 до -100 кгс/мм<sup>2</sup>, глубина распространения напряжений сжатия увеличивается от 120 до 160 мкм и более. Это свидетельствует о пластической деформации в этих слоях и положительной роли алмазного выглаживания в повышении качества поверхности. Аналогичные результаты по формированию остаточных напряжений сжатия были получены после выглаживания через медную, серебряную, хромовую и никелевую пленки.

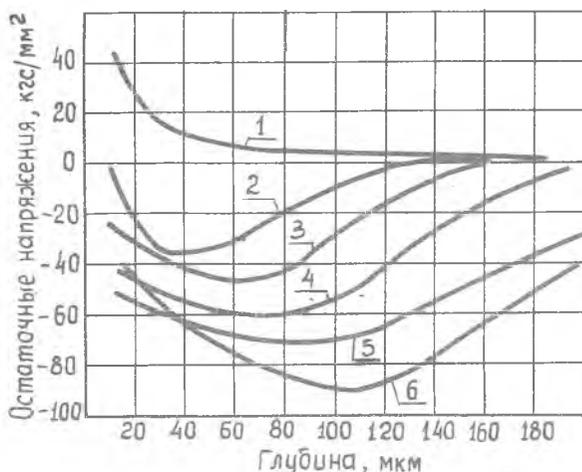
Установлено также, что уровень остаточных напряжений в осевом направлении ( в направлении подачи) на 10-20% выше, чем в тангенциальном, и максимум их находится вблизи поверхности, что может в большей степени оказать влияние на повышение усталостной прочности.

Многие детали из титановых сплавов в авиадвигателях работают при повышенных температурах. Поэтому были проведены эксперименты по установлению влияния температуры нагрева и времени выдержки на релаксацию остаточных напряжений на кольцевых образцах из сплава ВТ9, обработанных двумя способами. Одни образцы после термообработки только шлифовались, другие дополнительно выглаживались через кадмиевое покрытие. В первом случае в поверхностных слоях формировались остаточные напряжения, растяжения во втором - сжатия. Затем образцы нагревались в воздушной среде до 250 и 500<sup>o</sup>C и выдерживались в течение 1, 50 и 500 ч, определились остаточные напряжения  $\sigma_{\tau} - \mu \sigma_{\sigma}$ . Эксперименты показали, что при 250<sup>o</sup>C и выдержке до 500 ч. эпюры остаточных напряжений как для шлифованных, так и выглаженных образцов практически не изменяются. Выдержка



Р и с.1. Изменение микротвердости поверхностного слоя сплава ВТ9 после шлифования (4) и алмазного выглаживания через медную пленку на режиме:  $R_{\text{сш}} = 3 \text{ мм}$ ;  $S = 0,05 \text{ мм/об}$ ,  $P_y = 30 \text{ (I)}$ ; 20(2); 10(3) кгс

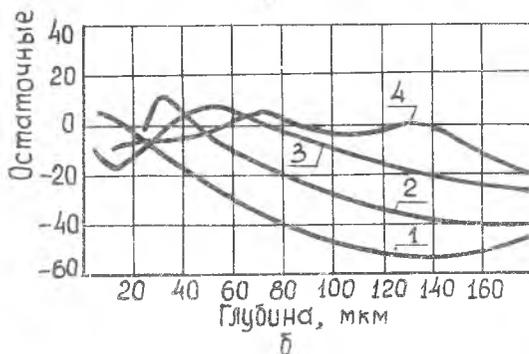
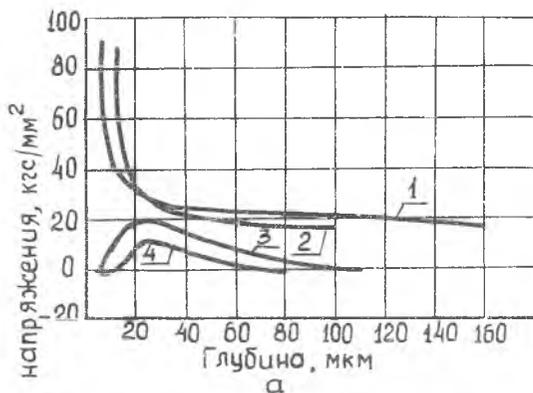
при 500°C в течение 50 ч в том и другом случаях приводит к



Р и с.2. Эпюры остаточных макронапряжений после шлифования (1) и алмазного выглаживания через рез кадмиевое покрытие на режиме:  $R_{сф} = 1,5$  мм;  $S = 0,05$  мм/об;  $V = 20$  м/мин;  $i = 1$ ; СОЖ - масло,  $P_y = 5$  (2); 10 (3); 15 (4); 20 (5); 25 (6) кгс

значительному уменьшению напряжений (рис.3), особенно у поверхности. После 500 ч они почти полностью релаксируют. Для деталей сложной формы это явление важно с точки зрения коробления. Для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, уменьшение напряжений сжатия снижает эффект упрочнения поверхности, что приводит к уменьшению долговечности. Тем не менее первоначальное существование сжимающих остаточных напряжений в течение некоторого времени (в зависимости от температуры нагрева) положительно сказывается на отдалении момента зарождения усталостной трещины, а также способствует залечиванию микродефектов поверхности за счет явлений диффузии.

Для выявления влияния алмазного выглаживания через покрытия на выносливость сплава ВТ9 были проведены усталостные испытания круглых образцов при симметричном изгибе. Испытания проводились на машине МУИ 10000 с частотой нагружения 50 Гц при температуре 20 и 400°C. Все образцы предварительно термообработывались,



Р и с.3. Эпюры остаточных напряжений шлифованных (а) и выглаженных (б) образцов из сплава ВТ9 после нагрева и выдержки при  $500^{\circ}\text{C}$  в течение 0(1); 1(2), 50(3), 500(4) ч (режим шлифования: круг КЗ, зернистость 16-25, твердость СМ1-СМ2,  $v_k = 40\text{ м/с}$ ,  $v_n = 15\text{ м/мин}$ ,  $\xi_{пр} = 5\text{ м/мин}$ ; режим алмазного выглаживания через кадмиевую пленку  $R_{сф} = 3\text{ мм}$ ,  $P = 30\text{ кгс}$ ,  $\xi = 0,05\text{ мм/об}$ , СОЖ-масло)

затем шлифовались до 7-8 классов карборундовыми кругами и покрывались различными металлами. Результаты усталостных испытаний приведены в таблице.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что нанесение гальванических пленок кадмия, меди и серебра толщиной в 5-10 мкм приводит к снижению условного предела усталостной прочности

Т а б л и ц а

Усталостная прочность образцов из сплава ВТ9  
при базовом числе циклов  $20 \times 10^6$  и  $t = 20$  и  $400^\circ\text{C}$

№ серии	Вид обработки образцов	$\sigma_{-1}$ кгс/мм <sup>2</sup>	
		20°C	400°C
1	Шлифование	42	42
2	Шлифование + кадмирование	40	40
3	Шлифование + меднение	-	40
4	Шлифование + серебрение	-	32
5	Шлифование + кадмирование + алмазное выглаживание при $P_y = 15$ кгс <sup>ж</sup> , $R_{\text{сф}} = 2$ мм	46	44
6	То же, $P_y = 30$ кгс	49	-
7	То же + покрытие стравлено	46	-
8	То же, что и в п.5 + покрытие стравлено	-	46
9	Шлифование + меднение + алмазное вы- глаживание $R_{\text{сф}} = 3$ мм, $P_y = 30$ кгс	-	49
10	Шлифование + серебрение + алмазное выглаживание $R_{\text{сф}} = 3$ мм, $P_y = 30$ кгс	-	45

от 42 до 40, 40 и 32 кгс/мм<sup>2</sup> или на 5,5 и 24% соответственно. Это можно объяснить наведением в слое покрытия растягивающих остаточных напряжений, а также некоторым увеличением содержания водорода в основе (до 0,010-0,018%). Применение алмазного выглаживания по покрытию повышает усталостную прочность на 7-16% по сравнению с исходным состоянием, получаемым при шлифовании. При этом долговечность возрастает на один-два порядка. Так, при напряжении  $\sigma = 50$  кгс/мм<sup>2</sup> долговечность шлифованных образцов составляет  $1,5 \cdot 10^5$ , а выглаженных через кадмий  $2 \cdot 10^6$ , медь и серебро -  $1,5 \cdot 10^7$  циклов. При стравливании выглаженной пленки покрытия усталостная прочность образцов остается на 7-9% выше по сравнению с исходным состоянием, что связано, как отмечалось, с качественными изменениями поверхностного слоя основы.

\* Остальные элементы режима выглаживания во всех опытах были следующие:  $S = 0,05$  мм/об,  $v = 15$  м/мин, СОЖ - масло

Таким образом, алмазное выглаживание деталей из сплава ВТ9 через пленки меди, кадмия, серебра, никеля и хрома позволяет существенно улучшить характеристики поверхностного слоя, повысить усталостную прочность и долговечность деталей. При удалении покрытия эффект от упрочнения остается положительным.

#### Л и т е р а т у р а

М и т р я е в К.Ф., С е р я п и н Ю.А., Б е л я е в А.С. Повышение усталостной прочности и малоциклового выносливости деталей из высокопрочных сталей методом алмазного выглаживания. В сб.: Усталостная прочность и долговечность авиационных конструкций". КуАИ, 1974.

УДК 621.787.4

В.М. Опарин, А.С.Беляев,  
М.А.Вишняков

#### АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ9 ЧЕРЕЗ ОКИСНЫЕ ПЛЕНКИ

Непрерывное ужесточение условий эксплуатации машин, связанное с повышением скоростей и мощностей, требует повышения качества поверхностного слоя деталей. Алмазное выглаживание как метод формирования поверхностного слоя неприменим к деталям из титановых сплавов ввиду их высокой химической активности. С целью исключения контакта алмаза и титанового сплава можно использовать различные пленки. Были проведены исследования возможности выглаживания сплава ВТ9 после термообработки, в результате которой на поверхности образовались окисные пленки.

Для отыскания оптимального режима, при котором образуется прочная с хорошим сцеплением с основой окисная пленка, термообработку образцов из ВТ9 проводили при температуре 400...700°C и выдержке в течение 15... 60 мин в воздушной среде при атмосферном давлении. Наилучшие результаты получены при выглаживании образцов, обработанных при температуре 700°C в течение 15 мин; в этом случае пленка не разрушалась при выглаживании в условиях высоких контактных нагрузок. Следует отметить, что термообработка на этом режиме вызывает незначительное увеличение количества водорода. В исходных образцах после шлифования было 0,005% водо-