

ностном слое в обоих направлениях формируются растягивающие напряжения. С увеличением степени легирования сплавов и ростом их высокотемпературной прочности температура резания возрастает; соответственно повышаются и остаточные растягивающие напряжения.

### Литература

1. Касимов Л.Н., Мухин В.С. Прибор для измерения тангенциальных остаточных напряжений. "Заводская лаборатория", № 1, 1967.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. Машгиз, 1963.
3. Савицкий Е.М. Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов. Изд. АН СССР, 1957.
4. Резников А.Н. Теплофизика резания. М., "Машиностроение", 1969.
5. Кравченко Б.А., Папшев Д.Д., Колесников Б.И., Моревков Н.И. Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов. Куйбышевское книжное изд-во, Куйбышев, 1966.
6. Исаев А.И. Влияние технологических факторов на остаточные напряжения в поверхностном слое при точении конструкционных сталей. "Передовой научно-технический и производственный опыт". Тема 10, № М-57-166/30, Москва, 1957.
7. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М., "Машиностроение", 1966.

УДК 621.787.4 : 669.14.018.44

**В.И.Егоров, К.Ф.Митряев**

### ВЛИЯНИЕ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ВЫНОСЛИВОСТЬ ЗАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Заропрочные и нержавеющие стали типа 1Х18Н10Т, 1Х16Н6, ЭИ736, ЭИ961 и деформируемые сплавы на никелевой основе ЭИ437Б, ЭИ598, ЭИ698 вполне удовлетворительно выглаживаются сферическим алмаз-

ным наконечником. Качество обработанной поверхности существенно улучшается при  $R_{\text{сф}} = 1,8+2,5$  мкм;  $S = 0,03+0,07$  мм/об;  $R_y = 15 - 35$  кг (в зависимости от свойств материала и  $R_{\text{сф}}$ ); числе проходов  $I+2$ ; скорости до 100 м/мин; смазка маслом "Веретенное-3" или "Индустриальное - 20". Высота неровностей уменьшается в несколько раз, класс чистоты повышается с 7-8 до 9-II (рис. 1). Улучшается микрорельеф поверхности. Выступы и впадины имеют закругления по радиусам 1000-2000 мкм, уменьшается наклон боковых сторон неровностей. Все это повышает контактную жесткость и износостойкость поверхностей. В результате пластической деформации верхние слои детали на глубину более 300 мкм упрочняются. Микротвердость на поверхности увеличивается на 20-60% (рис. 2). В них одновременно формируются сжимающие остаточные напряжения, достигающие предела текучести на сжатие упрочненного материала. На поверхности отсутствуют различного рода дефекты (задиры, вырывы, микротрещины, прижоги, вкрапления абразивных частиц и др.). Качественные показатели поверхности при алмазном выглаживании материалов с равномерными свойствами стабильны и легко поддаются регулировке за счет режима.

Улучшение качества поверхности при алмазном выглаживании способствует значительному (до 20-75%) повышению предела усталостной прочности жаропрочных материалов при нормальной температуре испытаний [1]. Так, по нашим данным, предел выносливости (на базе  $10^7$ ) шлифованных образцов из нержавеющей стали X18H9T и X16H6 составил 25 и 35 кг/мм<sup>2</sup>, а выглаженных 40 и 53 кг/мм<sup>2</sup>. При испытании сплава ЭИ437Б предел усталости шлифованных образцов составил 20 кг/мм<sup>2</sup>, точеных и полированных - 44 кг/мм<sup>2</sup>, а выглаженных - 56 кг/мм<sup>2</sup>.

Однако результаты холодных испытаний на усталость не всегда достаточны для заключения о целесообразности применения упрочняющей обработки. Ряд ответственных деталей газотурбинных двигателей работает при высоких температурах. Диски, валы, стяжные болты, лопатки и другие детали компрессоров, изготавливаемые из жаропрочных сталей ЭИ96I и ЭИ736, работают при температурах до 500-550°C, а детали турбин из сплавов ЭИ437Б, ЭИ598 - до 600 - 850°C. При повышенных температурах возрастает подвижность атомов кристаллической решетки, активизируются диффузионные процессы, происходит изменение структуры материала, его разупрочнение.

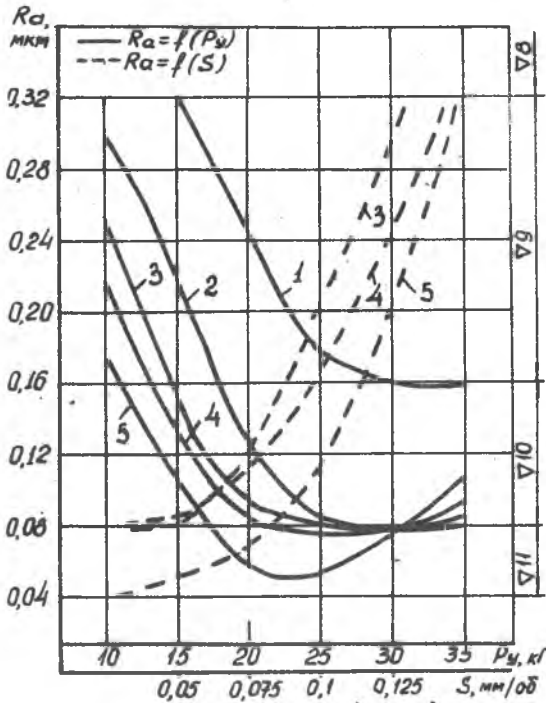


Рис.1. Зависимость шероховатости поверхности при алмазном выглаживании от силы деформации и подачи: 1-ЭИ698, 2-ЭИ598, 3-ЭИ437Б, 4-ЭИ736, 5-ХІ 8НІОТ ( $R_{сф} = 2,0 \text{ мм}$ ;  $S = 0,05 \text{ мм/об}$ ;  $i = 1$ ;  $V = 40 \text{ м/мин}$ ; СОЖ - масло "Индустриальное -20"; исходная шероховатость  $\nabla 6 - \nabla 7$ )

Наблюдается снижение микротвердости и релаксация остаточных напряжений. Эти явления протекают тем быстрее, чем ниже температура рекристаллизации. Холодная деформация поверхности-наклеп способствует снижению усталостной прочности в нагретом состоянии. При этом его влияние различно в зависимости от степени деформации [2]. Поэтому для ковышения ресурса изделий необходимо проведение усталостных испытаний при рабочих температурах, изучение изменения состояния верхних слоев материала во времени и в зависимости от вида и режима обработки детали.

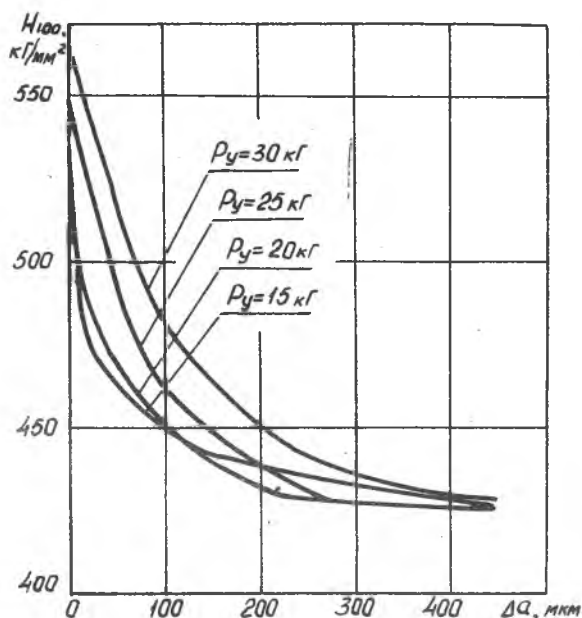


Рис.2. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя сплава ЭИ 437Б при различных силах выглаживания

На рис. 3 - 4 и таблицах 1, 2 приведены результаты усталостных испытаний образцов из сталей ЭИ961, ЭИ736 и сплавов ЭИ437Б, ЭИ598 при различных температурах и видах обработки. Испытания проводились на машине МВТ-10000 при симметричном круговом изгибе с частотой 50 гц на базе  $10^7$  циклов. Результаты испытаний были статистически обработаны по методу наименьших квадратов для установления связи между напряжениями и долговечностью<sup>ж)</sup>.

Из рис. 3 видно, что применение выглаживания с  $P_y = 20 \text{ кг}$  вместо полирования (кривые 1, 2) способствует повышению предела усталостной прочности стали ЭИ 961 при холодных испытаниях на  $11 \text{ кг/мм}^2$  или на 23%. Причем линия регрессии идет со значительно меньшим наклоном, что способствует повышению долговечности. При температурах  $400^\circ$  и  $550^\circ \text{ C}$  (кривые 3, 4 и 5, 6) эффективность алмазного выглаживания снижается. Повышение предела усталости по сравнению с полированием составляет соответственно 19 и 10 %.

<sup>ж)</sup> Испытания образцов стали ЭИ961 и сплава ЭИ598 проводились в лаборатории выносливости (ВИАМ, г. Москва) под руководством Н.Д. Лукова, стали ЭИ736 и сплава ЭИ437Б в НИГ кафедры "Сопротивление материалов" под руководством С.И. Иванова.

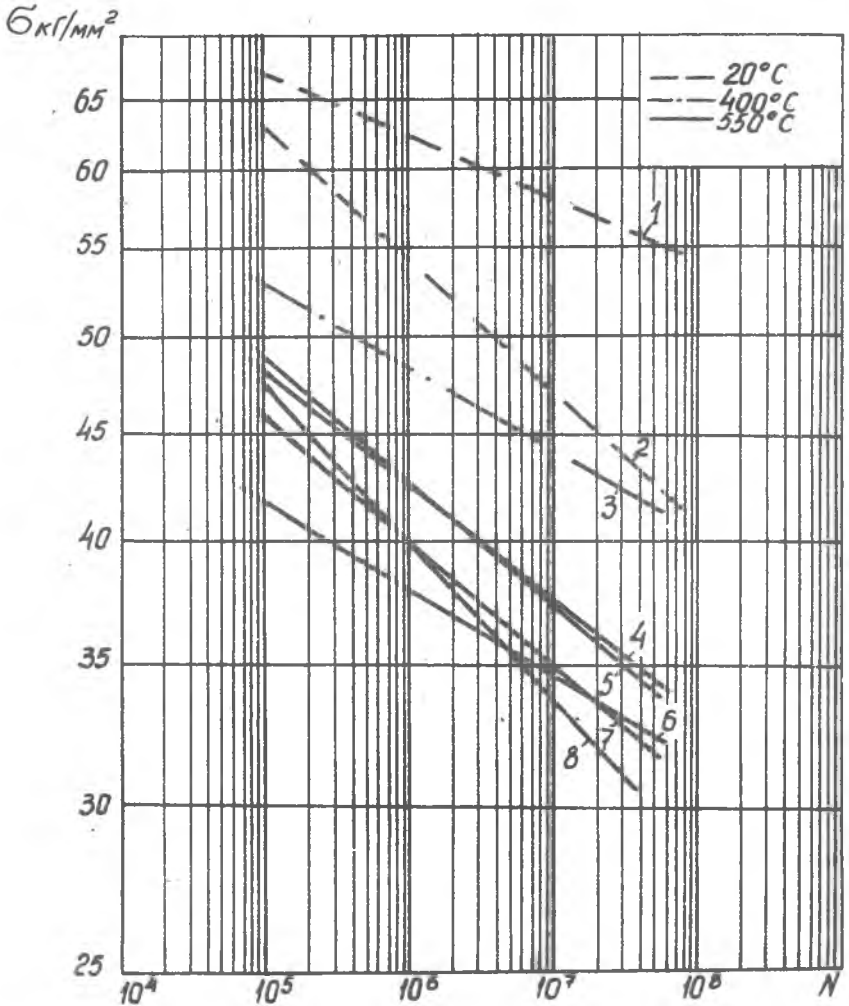


Рис.3. Кривые выносливости образцов из стали ЭИ 961, испытанных при разных температурах. Режим выглаживания:  $R_{\text{сф}} = 2,4 \text{ мм}$ ;  $l = I$ ;  $S = 0,05 \text{ мм/об}$ ;  $V = 20 \text{ м/мин}$ . Полирование шкуркой до  $\nabla 10$ . 1,2 -  $20^\circ\text{C}$ , выглаживание с  $P_y = 20 \text{ кг}$ ; полирование. 3,4 -  $400^\circ\text{C}$ , выглаживание с  $P_y = 20 \text{ кг}$ ; полирование. 5,6 -  $500^\circ\text{C}$ , выглаживание с  $P_y = 20 \text{ кг}$ ; полирование. 7,8 -  $550^\circ\text{C}$ , выглаживание с  $P_y = 30$  и  $10 \text{ кг}$ .

Применение выглаживания с пониженной силой  $P_y = 10 \text{ кГ}$ , в виду недостаточности создаваемого давления для полного проглаживания исходной шероховатости, и при увеличенной  $- P_y = 30 \text{ кГ}$  не дает эффекта или приводит к некоторому снижению предела выносливости при  $N = 10^7$  циклов. В последнем случае это связано с более значительным наклепом, который ускоряет процесс окисления и структурные превращения, способствующие разупрочнению материала, вследствие более ранней рекристаллизации.

Аналогичные выводы вытекают из рассмотрения таблицы I. Для стали ЭИ736 упрочняющая обработка на 20-30% при  $t = 20^\circ\text{C}$  и 10 + 18% при  $t = 500^\circ\text{C}$  повышает предел усталостной прочности по сравнению с полированием.

Таблица I.

Вид обработки	Сила выглаживания $P_y$ кГ	Температура испытания $^\circ\text{C}$	Предел выносливости		
			кГ/мм <sup>2</sup>	%	
				при 20 <sup>o</sup> C	при 500 <sup>o</sup> C
Полирование	-	20	52	100	-
Полирование	-	500	42	-	100
Обдувка дробью	-	20	68	130	-
Обдувка дробью	-	500	46	-	110
Выглаживание	10	20	66	127	-
Выглаживание	10	500	50	-	118
Выглаживание	20	20	62	119	-
Выглаживание	20	500	48	-	114

Таким образом, алмазное выглаживание деталей из жаропрочных сталей, работающих при температурах до 500-550<sup>o</sup>C, приводит к существенному повышению предела усталости.

Анализируя полученные результаты испытаний жаропрочного сплава на никелевой основе ЭИ598 (рис.4), видим, что при нормальной температуре алмазное выглаживание увеличивает условный предел усталости при  $N = 10^7$  циклов на 30% по сравнению с полированием. При температуре испытаний 700<sup>o</sup>C пределы усталости у полированных и выглаженных образцов приблизительно одинаковы

(32 и 33 кг/мм<sup>2</sup>), но у кривой 5 угловой коэффициент примерно в 2 раза меньше, чем у кривой 2. Поэтому при более длительных испытаниях для выглаженных образцов можно ожидать более высокого условного предела усталости.

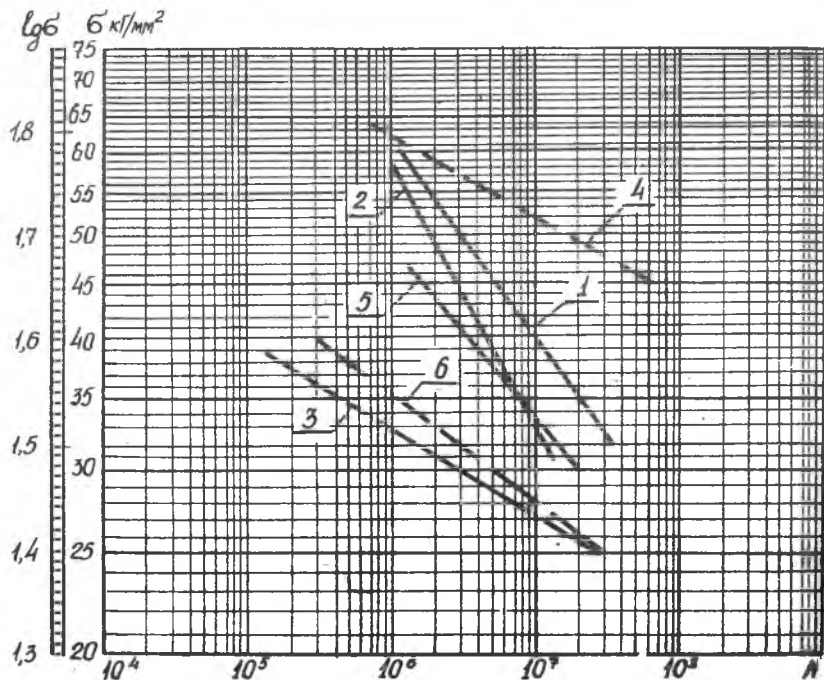


Рис. 4. Кривые выносливости образцов из сплава ЭИ 598. (1, 2, 3 — образцы полированные до  $\nabla 9$  и испытанные при 20, 700 и 850 °C, 4, 5, 6 — выглаженные,  $R_{\text{сф}} = 2,4$  мм;  $P_y = 20$  кг;  $i = 1$ ;  $S = 0,05$  мм/об;  $V = 20$  м/мин и испытанные при 20, 700 и 850 °C)

При максимальной рабочей температуре 850 °C пределы усталости выглаженных и полированных образцов (кривые 6 и 5) в области  $N \leq 2 \cdot 10^7$  также примерно одинаковы, при некотором превышении для первых. Однако линия регрессии их имеет большой наклон и в области более высокой длительности испытания предел усталости становится несколько ниже.

В таблице 2 приведены результаты испытаний на усталость при максимальной рабочей температуре 750 °C образцов из

сплава ЭИ437 Б, поверхность которых обрабатывалась различными способами: полированием шкуркой, алмазным выглаживанием ( $R_{сф} = 2,4$  мм;  $S = 0,05$  мм/об;  $V = 25$  м/мин;  $i = 1$ ) и обдувкой дробью ( $P_b = 4^{-0,2}$  атм;  $T = 10$  мин).

Таблица 2

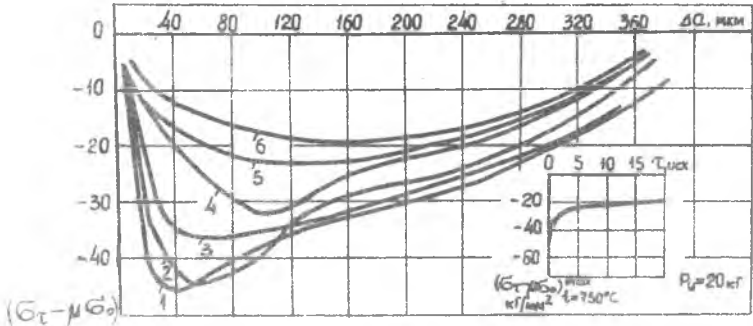
Вид обработки	Класс шероховатости	Предел выносливости	
		кг/мм <sup>2</sup>	%
Полирование шкуркой	9	35	100
Алмазное выглаживание с $R_u = 12$ кг	9	34	98
Алмазное выглаживание $R_u = 30$ кг	10	30	86
Обдувка дробью	6	27	77

Из таблицы 2 видно, что наибольшее сопротивление усталости показали полированные образцы и выглаженные с силой  $R_u = 12$  кг. Увеличение силы до 30 кг приводит к снижению предела усталостной прочности на 14%, применение обдувки дробью — на 23% по сравнению с полированием.

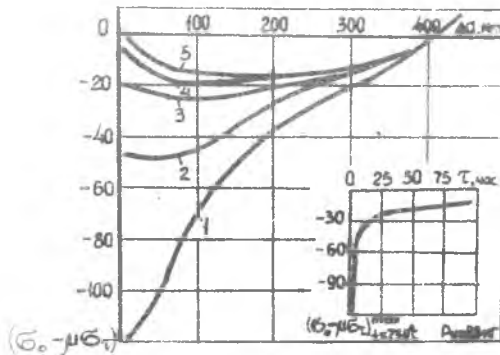
Таким образом, из приведенных результатов следует, что для жаропрочных сплавов при максимальных рабочих температурах и больших выдержках в поверхностных слоях образцов, получивших наклеп, происходят более существенные изменения и тем больше, чем выше степень наклепа. Из рис. 5 видно, что при температурах 450 и 600°C и выдержке в течение 5 + 8 часов происходит сравнительно небольшое снижение остаточных напряжений, однако при 750°C имеет место весьма существенная их релаксация. Тангенциальные напряжения сжатия уменьшаются до 27 кг/мм<sup>2</sup>, осевые до 90 кг/мм<sup>2</sup>. Увеличение выдержки до 20-40 часов приводит к их дальнейшему уменьшению до 20-40 кг/мм<sup>2</sup>. Увеличение выдержки до 100 часов практически их не изменяет. Опыты также показали, что релаксация остаточных напряжений происходит в первоначальный период более интенсивно у образцов выглаженных с большей силой  $R_u$ , то есть получивших большой наклеп. Релаксация напряжений происходит как за счет



деформации материала вследствие снижения предела текучести при нагреве, так и за счет активизации диффузионных процессов. Сохранение сжимающих остаточных напряжений на определенном уровне при увеличении выдержки объясняется образованием окилов в поверхностных деформированных слоях, сопровождающимся увеличением объема [3].



а)



б)

Рис. 5. Влияние температуры нагрева и времени выдержки на релаксацию остаточных напряжений после алмазного выглаживания сплава ЭИ 437Б ( $P_y = 20-25 \text{ кг}$ ,  $R_{сф} = 2 \text{ мм}$ ;  $i = 1$ ;  $\xi = 0,05 \text{ мм/об.}$ )

- а) Эпюры тангенциальных напряжений: 1-20°C; 2-450°C, 5 час; 3-600°C, 5 час; 4,5,6-750°C, 1,5,20 час.  
 б) Эпюры осевых напряжений: 1-20°C, 2,3,4,5-750°C, 8,30,50,100 час.

Нагрев и выдержка образцов приводит к медленному снижению микротвердости во времени. При  $t = 750^{\circ}\text{C}$  и  $\tau = 8$  часов микротвердость поверхности выглаженных образцов из сплава ЭИ437Б снизилась с 580-600 до 550-570 кг/мм<sup>2</sup>.

Шероховатость поверхности при нагреве не претерпевает заметных изменений.

## ВЫВОДЫ

1. Упрочнение алмазным выглаживанием деталей из жаропрочных сталей типа ЭИ96Г, ЭИ736, работающих при температурах до  $500-550^{\circ}\text{C}$ , способствует улучшению качества поверхности и повышению предела выносливости до 10-20%.

2. Выглаживание деталей из жаропрочных сплавов типа ЭИ598 и ЭИ437, работающих при температурах менее  $600^{\circ}$ , также дает повышение выносливости. При максимальных рабочих температурах  $850$  и  $750^{\circ}\text{C}$  применение выглаживания полезно для деталей с небольшим ресурсом.

3. При длительной работе остаточные напряжения релаксируются, прочность поверхностных слоев снижается, что приводит к уменьшению предела выносливости. Для жаропрочных сплавов более приемлемы режимы выглаживания с меньшими усилиями.

## Литература

1. Митряев К.Ф., Егорев В.М., Мальков Г.Ф. и др. Повышение усталостной прочности жаропрочных материалов алмазным выглаживанием поверхности металлов. Сб. "Остаточные напряжения". Труды КуАИ, вып. 53. Куйбышев, 1971.
2. Иммуниа Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. "Металлургия", М., 1964.
3. Мухин В.С., Турков Б.В., Матвеев Л.В. и др. Качество поверхностного слоя деталей из сплава ЭИ220 после эксплуатации. Сб. "Вопросы оптимизации резания металлов". Труды УАИ, вып. 29, Уфа, 1972.