

РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ И СТАЛЯХ

Установлению температурно-временных зависимостей изменения остаточных напряжений уделяется большое внимание, так как на их основе можно прогнозировать надежность работы деталей в условиях эксплуатации.

В статье приведены результаты исследований релаксации осевых и тангенциальных остаточных напряжений в зависимости от температуры нагрева  $T$ , продолжительности выдержки  $\tau$  (основных эксплуатационных факторов) и нормальной силы деформации  $P_y$  (основного фактора, определяющего степень упрочнения) при алмазном выглаживании жаропрочных сплава ХН77ТЮР (ЭИ437Б) и стали 1Х12Н2ВМФ (ЭИ96Г). Для нахождения аналитических и графических зависимостей использовался метод ортогонального композиционного планирования экспериментов второго порядка [1]. Уровни, интервалы варьирования факторов и условия испытаний приведены в табл. I. Диапазон температур был взят близким к эксплуатационным для многих деталей газотурбинных двигателей, изготавливаемых из указанных материалов. В связи с тем, что релаксация остаточных напряжений протекает активно в основном в первые часы, а затем темп ее резко снижается [2], [3], продолжительность нагрева в экспериментах не превышала 13 ч. Верхнее значение силы  $P_y$  при выглаживании было ограничено величиной, при которой для сферического наконечника радиусом 2 мм в поверхностном слое наблюдаются наибольшие сжимающие остаточные напряжения, нижний — значением силы, обеспечивающей проглаживание шероховатостей седьмого класса.

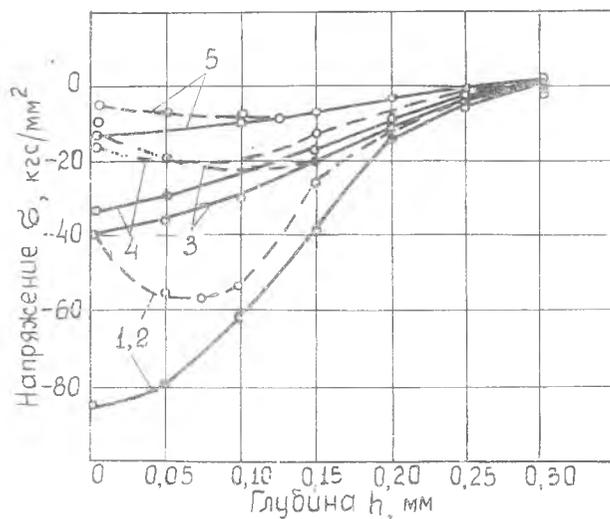
Партии образцов в виде колец и втулок диаметром 52 мм, выглаженные на соответствующих режимах, делились на группы по три образца, из которых одна группа не подвергалась термообработке и характеризовала исходное состояние поверхностного слоя. Остальные группы нагревались в среде аргона (для предотвращения окисления и сохранения химического состава поверхностного слоя) до разных температур и выдерживались различное время. Остаточные

напряжения определялись путем измерения деформаций при непрерывном стравливании поверхностных слоев с последующими расчетами по известным формулам [4] .

Т а б л и ц а I

Уровни варьирования факторов	Условия испытания			
	T, °C		τ, ч	P <sub>y</sub> , кгс
	ЭИ96Г	ЭИ437Б		
Звездное плечо -I, 2I5	267,5	417,8	1,0	2,85
Нижний уровень - I	300	450	2,0	5
Основной уровень 0	450	600	7,0	15
Верхний уровень +I	600	750	12,0	25
Звездное плечо +I, 2I5	632,5	782,3	13,0	27,15
Интервал варьирования	150	150	5,0	10

В качестве примера на рис. I приведены эпюры тангенциальных  $\sigma_{\tau}$



Р и с. I. Изменение остаточных напряжений в стали ЭИ96Г после алмазного выглаживания в зависимости от температуры и продолжительности нагрева:  
 1 - исходное состояние; 2 - 270°C, 7ч; 3 - 450°C, 7ч;  
 4 - 450°C, 13ч; 5 - 630°C, 7 ч (---  $\sigma_{\tau}$ ; —  $\sigma_{\sigma}$ )

и осевых  $\sigma_{\sigma}$  остаточных напряжений в стали ЭИ96Г после

алмазного выглаживания ( $P_y = 15$  кгс,  $R = 2,0$  мм,  $i = 1$ ,  $\zeta = 0,05$  мм/об,  $v = 40$  м/мин, СОЖ - масло "индустриальное") до и после нагревов. Матрица планов серии опытов и результаты определения максимальных значений остаточных напряжений приведены в табл.2. Результаты экспериментов позволили выявить функциональную зависимость устойчивости максимальных тангенциальных и осевых остаточных напряжений от всех трех исследуемых факторов и описать их в исследуемой области (см.табл. I) следующими адекватными математическими моделями:

для стали ЭИ96Г

$$|\sigma_{\tau}^{\max}| = 81,7 - 0,206T - 1,46\tau + 2,9P_y + 0,000156T^2 + 0,0456\tau^2 - 0,0293P_y^2 - 0,03TP_y; \quad (1)$$

$$|\sigma_{\sigma}^{\max}| = 149 - 0,34T - 2,0\tau + 1,9P_y + 0,000244T^2 + 0,1\tau^2 - 0,0015TP_y - 0,003TP_y; \quad (2)$$

для сплава ЭИ437Б

$$|\sigma_{\tau}^{\max}| = 62,0 - 0,174T - 1,32\tau + 3,19P_y + 0,000185T^2 + 0,094\tau^2 - 0,0042TP_y; \quad (3)$$

$$|\sigma_{\sigma}^{\max}| = 222 - 0,29T - 7,2\tau - 2,86P_y + 0,000087T^2 + 0,133\tau^2 + 0,162P_y^2 + 0,00225TP_y. \quad (4)$$

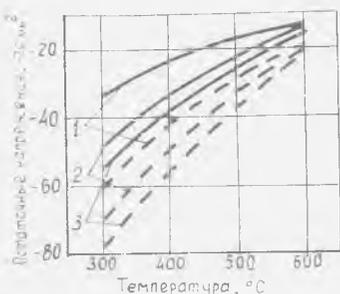
Графики, построенные по уравнениям (1) - (2), представлены на рис. 2.

Исследованиями установлено, что релаксация остаточных напряжений в образцах из стали ЭИ96Г при температуре до  $300^{\circ}\text{C}$  незначительна. Так, из рис.2 видно, что при  $T=300^{\circ}\text{C}$  и выдержке в течение 12 ч напряжения снизились всего на 15%. При  $450-600^{\circ}\text{C}$  релаксация напряжений протекает более заметно, причем наиболее активно в первые 2-6 ч и тем значительнее, чем выше температура. Так, при  $450^{\circ}\text{C}$  в первые 2 ч уровень максимальных напряжений снижается на 35%, а после выдержки в течение 12 ч - на 50-55%, при  $600^{\circ}\text{C}$  - соответственно на 65 и 75%. При выдержке более 8-12 ч напряжения стабилизируются незначительно и практически стабилизируются на уровне - 10... 30 кгс/мм<sup>2</sup> (меньшие значения относятся к  $T=600^{\circ}\text{C}$ , большие к  $T=450^{\circ}\text{C}$ ). Из рис. 2 также видно, что с увеличением силы выглаживания  $P_y$  возрастает уровень формируемых остаточных напря-

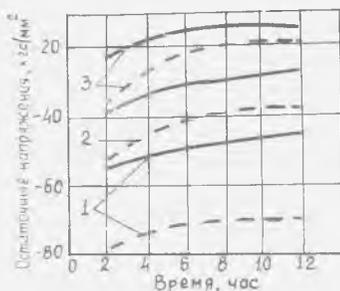
Таблица 2

№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Э/96I		Э/437Б		
												Ст	С <sub>о</sub>	Ст	С <sub>о</sub>	
1	+	+	+	+	0,27	0,27	0,27	0,27	+	+	+	+	-12	-18	-7	-16
2	+	-	+	+	0,27	0,27	0,27	0,27	+	+	+	+	-53	-78	-41	-63
3	+	+	-	+	0,27	0,27	0,27	0,27	+	-	-	+	-22	-32	-11	-21
4	+	-	-	+	0,27	0,27	0,27	0,27	+	+	+	-	-61	-90	-46	-96
5	+	+	+	-	0,27	0,27	0,27	0,27	+	-	+	-	-9	-14	-4	-10
6	+	-	+	-	0,27	0,27	0,27	0,27	+	-	-	+	-32	-58	-13	-54
7	+	+	-	-	0,27	0,27	0,27	0,27	+	-	-	+	-16	-28	-6	-18
8	+	-	-	-	0,27	0,27	0,27	0,27	+	+	+	-	-36	-65	-16	-69
9	+	-I,2I5	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	+	0	0	0	-59	-85	-30	-72
10	+	+I,2I5	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	+	0	0	0	-9	-12	-2	-5
11	+	0	-I,2I5	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	0	0	-37	-54	-18	-50
12	+	0	+I,2I5	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	0	0	-24	-34	-12	-31
13	+	0	0	-I,2I5	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	0	0	-19	-38	-8	-36
14	+	0	0	+I,2I5	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	0	0	-30	-42	-16	-40
15	+	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	0	0	-28	-40	-14	-38

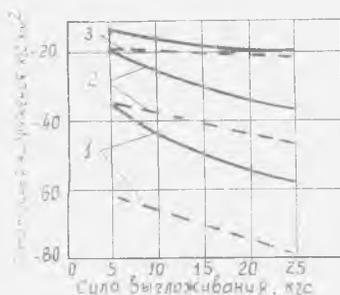
жений, увеличивается и степень их релаксации. На образцах, выглаженных с большими силами, при  $450^{\circ}\text{C}$  они остаются на более высоком уровне, при  $600^{\circ}\text{C}$  приходят примерно к одному значению.



а



б



в

Р и с.2. Изменение максимальных значений остаточных напряжений в образцах из стали ЭИ96I после алмазного выглаживания в зависимости: а - от температуры: 1,2,3 - соответственно  $P_y = 10, 15, 20$  кгс; б - от продолжительности нагрева: 1,2,3 - соответственно  $t_y = 10, 15, 20$  кгс; в - от силы выглаживания: 1,2,3 - соответственно  $t = 300, 450, 600^{\circ}\text{C}$

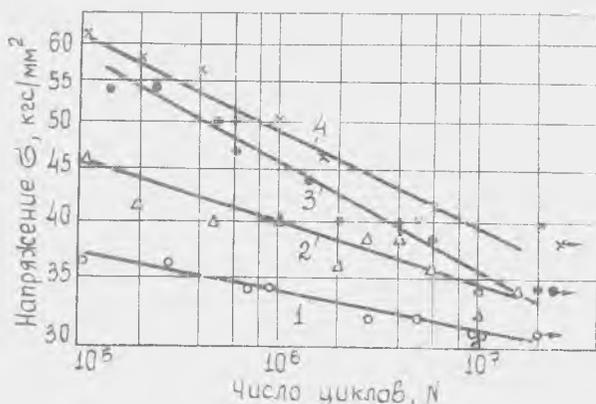
Это связано с тем, что при температурах, близких к температуре кристаллизации, значительно возрастает кинетическая энергия атомов кристаллической решетки и подвижность дислокаций, обуславливающих активные диффузионные процессы и явления ползучести. Следует также отметить, что в процессе релаксации характер эпюр (рис.1) мало изменяется. В осевом направлении максимум напряжений остается у поверхности, в тангенциальном - на глубине  $0,08-0,1$  мм. Те и другие напряжения медленно снижаются по глубине.

Аналогичные результаты по релаксации остаточных напряжений получены на образцах из сплава ЭИ437Б. Нагрев до температуры  $450-500^{\circ}\text{C}$  не оказывает заметного влияния на величину и характер

распределения остаточных напряжений, наведенных при алмазном выглаживании. При более высоких температурах остаточные напряжения сжатия в первые часы нагрева резко уменьшаются, а затем постепенно стабилизируются на уровне  $-10...40 \text{ кгс/мм}^2$ . Так, при  $750^\circ\text{C}$  они составляют  $-10...15 \text{ кгс/мм}^2$ . Этот уровень напряжений, по-видимому, определяется уровнем запаса внутренней потенциальной энергии, который является уже недостаточным для дальнейшего освобождения дислокаций, преодоления силы препятствий и движения, а значит, и для протекания связанных с ними явлений ползучести и разупрочнения.

Сулима А.М. [2] считает, что абсолютно полного снятия остаточных напряжений после нагревов даже при температуре, близкой к температуре рекристаллизации, не наблюдается. Из возможных причин сохранения последних он отмечает селективное окисление жаропрочных сплавов, сопровождаемое возникновением термических сжимающих напряжений.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что остаточные напряжения, наведенные при поверхностном упрочнении, в диапазоне рабочих температур релаксируют до определенного уровня, соответствующего температуре нагрева, и остаются у поверхности сжимающими. Следовательно, в наблюдающемся положительном эффекте повышения усталостной прочности



Р и с.3. Кривые усталости образцов из сплава ЭИ437Б после: 1,2 — полирования,  $700^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$ ; 3 — полирования,  $600^\circ\text{C}$ ; 4 — алмазного выглаживания,  $700^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$

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