

2. Кононов В.К. Расчет температурного поля от движущегося полосового источника через максимальную температуру на поверхности. "Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов". Межвузовский сборник, вып. I. Куйби, г. Куйбышев, 1973.

3. Сидин С.С., Рыкунов Н.С. Бесприжоговые режимы резания при плоском шлифовании. Тезисы докладов на секция "Теплофизика шлифования". Конференция "Теплофизика технологических процессов", Тельятти, 1972.

4. Седов Л.А. Методы подобия и размерности в механике. Физматгиз. М., 1957.

5. Надимов В.В., Чернова А.Н. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., "Наука", 1965.

УДК 621. 9.015

А.Д.Макаров, В.С.Мухин, В.М.Кишуров

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ И ОСТАТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В статье излагаются результаты комплексного исследования влияния условий резания и физико-механических свойств жаропрочных сплавов на величину остаточных напряжений первого рода в поверхностном слое. Исследование проводилось при точении жаропрочных сплавов ЭИ437А, ЭИ437БУ, ЭИ617, ЭИ826, ЭИ929 и ЭП220, относящихся к группе деформируемых жаропрочных сплавов на никелевой основе, упрочняющихся вследствие выделения интерметаллидной γ - фазы типа Ni_3 (Al, Ti). Чистовое точение ($t = 0,5$ мм; $S = 0,09$ мм/об) выполнялось резцом ВК6М ($\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $\chi = 0^\circ$; $z = 0,5$ мм; $\lambda = 0^\circ$) в широком диапазоне скоростей резания (10-50 м/мин). Остаточные напряжения измерялись механическим методом [1], в осевом

и тангенциальном направлениях и рассчитывались с учетом их взаимного влияния [2]. Исследовались глубина и степень наклепа поверхностного слоя, прочностные и пластические свойства сплавов при различных температурах, с построением так называемых ориентировочных прямых истинных напряжений [3], позволяющих определить по углу их наклона склонность металла к упрочнению при деформации. Помимо средней температуры контакта, измеряемой методом естественной термопары, определялась также (расчетным путем по методике [4]) температура на задней поверхности инструмента θ_3 .

Исследованиями выявлен сложный характер взаимосвязи между физико-механическими свойствами сплавов, условиями обработки и остаточными напряжениями в поверхностном слое, определяемый уровнем скорости (температуры) резания. На рис.1 показан характер эпюры остаточных тангенциальных и осевых напряжений в сплаве ЭИ437ВУ. В поверхностном слое других исследованных сплавов характер эпюры напряжений идентичный, разница заключается лишь в величине напряжений на различных горизонтах от поверхности. На рис.2 приведены данные по влиянию скорости резания на максимальное значение напряжений в первом горизонте для всех исследованных сплавов. На рис.3 приведено изменение температурных напряжений σ_T , предела текучести σ_S , остаточных осевых $\sigma_{o\max}$ и тангенциальных напряжений $\sigma_{t\max}$, глубины h_c и степени N наклепа и коэффициента трения по задней поверхности μ' в зависимости от температуры для сплава ЭИ617. Данные рис.1,2,3 показывают, что точение жаропрочных сплавов на всех исследованных скоростях приводит к формированию в первом горизонте в тангенциальном направлении только растягивающих напряжений. Вместе с тем, анализ температурных условий резания, оценка температурных напряжений и сравнение их с пределами текучести материала показал, что на низкой скорости резания (10 м/мин), когда средняя температура контакта на задней поверхности для различных жаропрочных сплавов не превышает 530°C (табл.1), в поверхностном слое термопластические деформации протекать не должны. Следовательно, на низкой скорости резания формирование растягивающих напряжений в сплавах не связано с действием теплового фактора. Это подтверждается наличием сжимающих напряжений в осевом направлении. Из данных рис.1,2 и табл. 1 видно, что при точении сплавов на скорости $V = 10$ м/мин в первом горизонте наблюдаются только сжимающие осевые напряжения $22 + 45$ кг/мм².

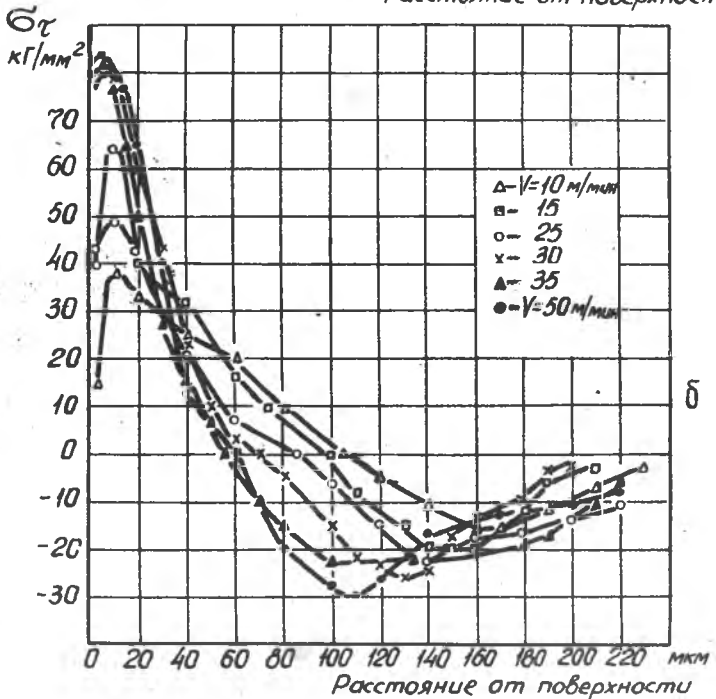
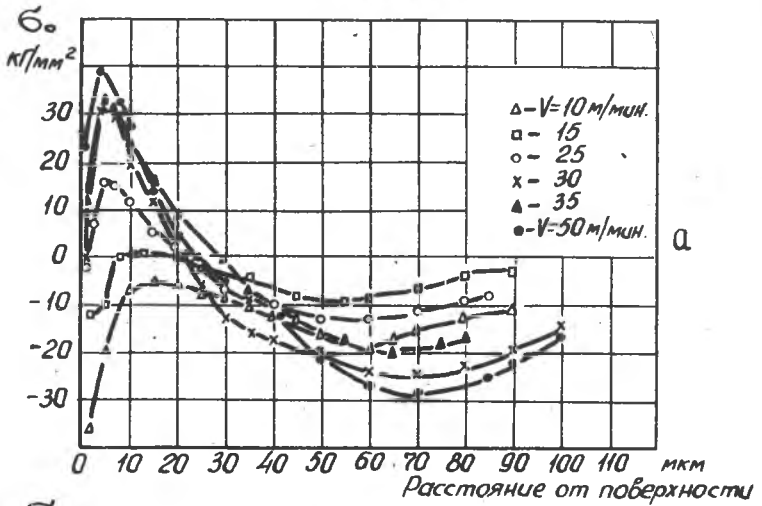


Рис. I Остаточные осевые (а) и тангенциальные (б) напряжения в поверхностном слое сплава ЭИ437БУ

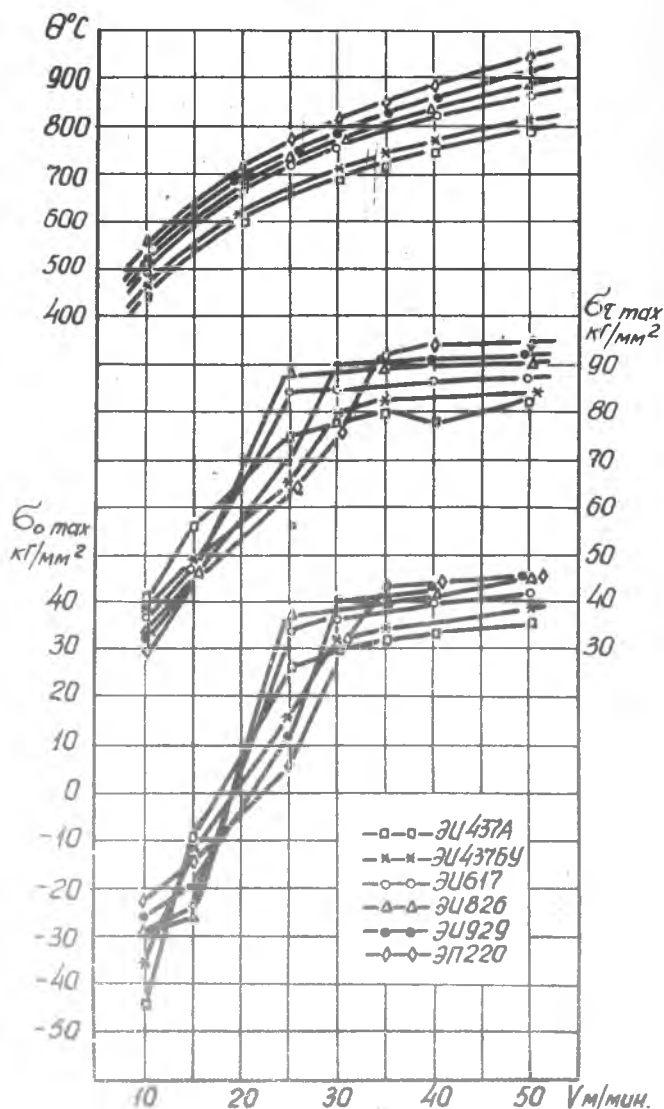


Рис.2. Влияние скорости резания на максимальное значение остаточных осевых и тангенциальных напряжений и среднюю температуру резания в Γ^{III} горизонте при точении жаропрочных сплавов

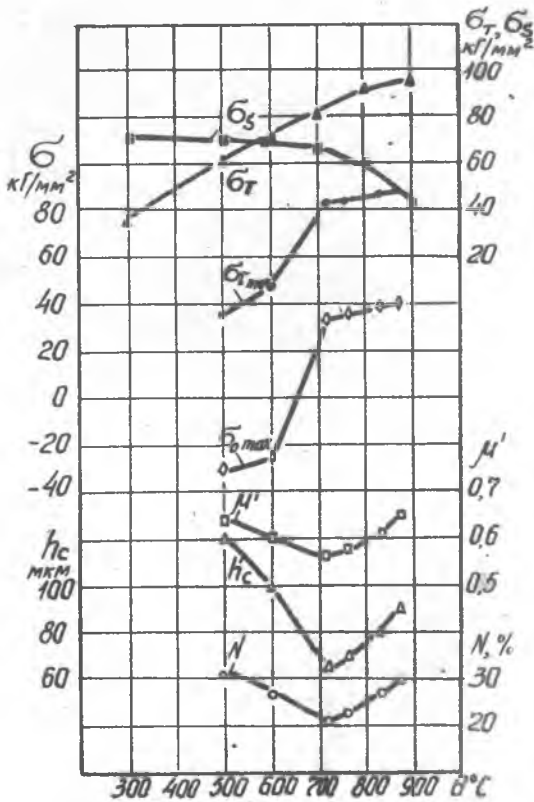


Рис.3. Влияние температуры на μ' , характеристики наклепа, остаточные и температурные напряжения, предел текучести. Сплав ЗИ617

Причиной формирования растягивающих тангенциальных напряжений и сжимающих осевых могут быть специфические условия деформации металла поверхностных слоев (действие силового фактора) [5],[6].

Полученные данные показывают также, что при резании сплава ЗИ437А на скорости 10 м/мин наибольшие остаточные напряжения как в осевом, так и тангенциальном направлении формируются в

поверхностном слое. Этот сплав по сравнению с другими материалами рассматриваемой группы в меньшей степени легирован, имеет самые высокие пластические свойства (табл. I) и наиболее склонен к упрочнению при деформировании.

Сплавы ЭИ437БУ, ЭИ617, ЭИ826, ЭИ929 и ЭП220 более легированы, содержат большее количество упрочняющей γ' -фазы; пластичность этих сплавов соответственно снижается. Поэтому их поверхностный слой деформируется в меньшей мере, о чем свидетельствуют результаты измерения глубины и степени наклепа. При обработке этих сплавов формируются меньшие по величине остаточные напряжения, чем у сплава ЭИ437А. Связь между максимальной величиной остаточных напряжений в I^{ом} горизонте и характеристикой пластичности δ , взятой при температуре, равной средней температуре контакта на задней поверхности для каждого сплава (при $V = 10$ м/мин), найдена в виде уравнений

$$\sigma_{\tau \max} = 22,5 + 0,59 \delta \quad \text{кг/мм}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{\sigma \max} = -1,22 \delta - 5 \quad \text{кг/мм}^2, \quad (2)$$

где δ - относительное удлинение сплава, %.

Резание на высокой скорости (при высокой температуре) дает противоположную картину изменения остаточных напряжений для рассматриваемых сплавов (рис. I, 2, 3 и табл. I). Приведенные данные показывают, что при резании сплавов на скорости 40 м/мин в поверхностном слое должны протекать термопластические деформации, так как температурные напряжения значительно превышают предел текучести сплавов.

В этих условиях величина остаточных напряжений будет зависеть от температуры и предела текучести обрабатываемого материала. Данные табл. I показывают, что резание сплавов с более высокой жаропрочностью сопровождается и более высокими температурами; например, при $V = 40$ м/мин средняя температура на задней поверхности при точении сплава ЭИ437А составляет 680°C , сплава ЭИ826 - 750°C , а сплава ЭП220 - 820°C . Несмотря на рост температуры, предел текучести у этих сплавов также возрастает с 59 кг/мм^2 у сплава ЭИ437А (при $\theta_3 = 680^\circ\text{C}$) до 76 кг/мм^2 у сплава ЭП220 (при $\theta_3 = 820^\circ\text{C}$). Отношение температурных напряжений к пределу текучести для всех исследованных сплавов практи-

чески остается на одинаковом уровне (I,2 + I,4). Это должно способствовать наведению в более легированных сплавах более высоких остаточных напряжений. Эти выводы полностью подтверждаются экспериментальными данными (рис.2 и табл.I). Как в тангенциальном, так и осевом направлении образуются только растягивающие напряжения, что указывает на механизм формирования напряжений, связанный с термопластическими деформациями. При

$V = 40$ м/мин в поверхностном слое низколегированного сплава ЭИ437А максимальная величина тангенциальных напряжений в первом горизонте составляет 78 кг/мм^2 , для более легированных сплавов эти напряжения повышаются и составляют, например, для сплава ЭИ617 - 87 кг/мм^2 , а для сплава ЭП220 - 94 кг/мм^2 . Аналогичные выводы можно сделать и применительно к осевым остаточным напряжениям. Пластические свойства и коэффициент упрочнения сплавов в рассматриваемом температурном диапазоне изменяются незначительно ($\delta = 8 + 12\%$, $K = 0,8 + 1,0$) и, по-видимому, не оказали своего влияния на механизм формирования напряжений. Снижение коэффициента трения по задней поверхности μ' с 0,65 до 0,31 (как характеристики действия силового фактора) по мере увеличения жаропрочности сплавов способствовало наведению все возрастающих растягивающих напряжений. Изменение $\sigma_{\tau \max}$ и $\sigma_{o \max}$ в зависимости от температуры на задней поверхности при резании металлов с $V = 40$ м/мин описывается уравнениями:

$$\sigma_{\tau \max} = 0,116 \theta_3 + 1,5 \quad \text{кг/мм}^2, \quad (4)$$

$$\sigma_{o \max} = 0,92 \theta_3 - 28 \quad \text{кг/мм}^2. \quad (5)$$

Величина напряжений может быть также подсчитана в зависимости от средней температуры резания

$$\sigma_{\tau \max} = 0,117 \theta - 8 \quad \text{кг/мм}^2, \quad (6)$$

$$\sigma_{o \max} = 0,916 \theta - 36 \quad \text{кг/мм}^2. \quad (7)$$

Определенный интерес представляют данные по остаточным напряжениям и их изменению при точении сплавов на оптимальных скоростях резания V_o [7]. Как видно из табл.I величина оптимальной

скорости для исследованных сплавов различна. Для низколегированного сплава ЭИ437А $V_0 = 35$ м/мин; по мере увеличения степени легирования (при переходе от сплава ЭИ437А к ЭИ826, см. табл. I) оптимальная скорость снижается до $V_{0opt} = 25$ м/мин. Для сплавов ЭИ929 и ЭП220 V_0 вновь возрастает до 30 и 35 м/мин соответственно. Однако, независимо от уровня оптимальных скоростей резания, средняя температура резания (оптимальная) и температура на задней поверхности инструмента, по мере повышения высокотемпературной прочности сплавов, повышаются. Так, при точении сплава ЭИ437А на скорости $V_0 = 35$ м/мин оптимальная температура резания $\theta_0 = 710^\circ\text{C}$, (для сплава ЭИ826 при $V_0 = 25$ м/мин $\theta_0 = 730^\circ\text{C}$), а для сплава ЭП220 при $V_0 = 35$ м/мин $\theta_0 = 850^\circ\text{C}$. Возрастает также температура на задней поверхности - с 640°C до 790°C . В соответствии с ростом температуры повышаются и остаточные напряжения растяжения как в тангенциальном, так и осевом направлениях. Сопоставление значений σ_s и σ_r при соответствующих температурах показывает, что образование напряжений связано с термопластическими деформациями. Повышение остаточных напряжений связано с ростом температуры и одновременным повышением прочностных свойств сплавов. Снижение коэффициента трения по задней поверхности и уменьшение глубины и степени наклепа при резании сплавов на оптимальных скоростях способствовали повышению растягивающих напряжений в более легированных сплавах. Максимальное значение остаточных напряжений в I^{ом} горизонте в зависимости от температуры на задней поверхности (при резании сплавов на оптимальных скоростях) может быть найдено из уравнений

$$\sigma_{r \max} = 0,085 \theta_{03} + 29 \text{ кг/мм}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{s \max} = 0,075 \theta_{03} - 15 \text{ кг/мм}^2. \quad (8)$$

Физико-механические свойства сплавов определяют и температуру перехода осевых сжимающих напряжений в растягивающие (температуру начала термопластических деформаций). Для сплавов, имеющих большую жаропрочность и больший предел текучести, необходимы и более высокие температуры для протекания термопластических деформаций. Эксперименты и расчеты показывают (рис. 2 и табл. 2), что для низколегированного сплава ЭИ437А температура на задней поверхности, соответствующая началу термопластических деформаций, составляет 510°C , для более жаропрочного сплава ЭИ826 - 600°C , а для сплава ЭП220 - 700°C . Вместе с тем, для всех исследованных

Некоторые характеристики процесса резания, механических свойств и качества
поверхностного слоя при обработке жаропрочных сплавов

Марка сплава	Скорость резания V м/мин	Средняя температура резания °C	Расчетная температура на заданной поверхности θ ₃ °C	φ при θ ₃ %		γ при θ ₃ %		Предел текучести при температуре деформации σ _{0.2} кг/мм ²	Кoeffициент упрочнения при деформации K _φ	Температура тугоплавных металлов при деформации θ ₃ °C кг/мм ²	Кoeffициент трения при заданной скорости резания μ	Наклеп		Максимальное напряжение при сдвиге	
				Нс	N %	Тангенциальные	Осевые								
ЖИ437А	10	440	440	32	3	62	1,57	50	-	150	39	+41	-40		
	10	450	450	27	23	64	1,30	56	0,70	130	35	+39	-36		
	10	490	470	21	21	69	1,29	55	0,64	120	31	+36	-30		
	10	510	490	21	20	70	1,26	58	0,70	100	30	+34	-29		
	10	530	500	16	18	72	1,22	58	0,60	90	27,5	+32	-26		
ЖИ220	10	560	530	14	16	80	1,20	61	0,72	70	24	+30	-22		
ЖИ437А	40	750	680	12	18	59	0,82	71	0,65	90	26	+78	+32		
	40	760	690	13	16	60	0,9	85	0,64	80	27	+83	+35		
	40	830	740	7	11	65	0,8	83	0,6	80	27	+87	+39		
	40	840	730	11	16	65	1,0	80	0,51	85	27	+89	+41		
	40	850	760	9	13	66	1,0	85	0,41	85	28	+91	+44		
ЖИ220	40	890	820	8	9	76	1,0	98	0,31	90	30	+94	+45		
ЖИ437А	36 ^ж)	710	640	18	18	80	1,1	71	0,65	90	26	+80	+31		
	37 ^ж)	720	640	16	16	81	0,95	80	0,62	70	26	+80	+31		
	25 ^ж)	750	650	12	16	66	1,1	79	0,57	65	21,5	+84	+34		
	28 ^ж)	730	660	16	20	68	1,1	75	0,46	65	20,5	+88	+37		
	30 ^ж)	790	710	9	12	71	1,0	82	0,42	60	20	+90	+40		
3Д220	36 ^ж)	850	790	8	10	78	1,0	94	0,32	55	18	+92	+43		

ж) Оптимальные скорости резания V₀

сплавов условия, при которых зафиксировано начало термопластических деформаций, идентичны: отношение предела текучести к температуре ($\sigma_s/\theta_{3л}$) для всех сплавов практически одинаково и составляет $0,106 \pm 0,116$ (табл.2).

Таблица 2

Марка сплава	ЭИ437А	ЭИ437ВУ	ЭИ617	ЭИ826	ЭИ929	ЭП22С
Температура, соответствующая переходу сжимающих осевых напряжений в растягивающие (на задней поверхности)	510	540	590	600	620	700
Предел текучести σ_s при $\theta_{3л}$	59	60,0	65	65	66	75,5
Отношение $\frac{\sigma_s}{\theta_{3л}}$	0,116	0,111	0,110	0,108	0,106	0,108

В ы в о д ы

1. Характер влияния физико-механических свойств сплавов и условия резания на остаточные поверхностные напряжения зависит от скорости (температуры) резания.

2. При точении на низких скоростях, когда температура недостаточна для протекания термопластических деформаций, в поверхностном слое в осевом направлении формируются сжимающие напряжения, в тангенциальном направлении - напряжения растяжения. При этом в менее легированных и более пластичных сплавах, склонных к пластической деформации и упрочнению, формируются большие по величине остаточные напряжения. При температуре начала термопластических деформаций осевые сжимающие напряжения переходят в растягивающие.

3. При резании на высоких скоростях, когда температура достаточна для протекания термопластических деформаций, в поверх-

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 нержавеющей стали типа 1Х18Н10Т, 1Х18Н6, ЭИ736, ЭИ961 и деформируемые сплавы на никелевой основе ЭИ437Б, ЭИ598, ЭИ698 вполне удовлетворительно выглаживаются сферическим алмаз-