

А. В. ПОДЗЕЙ, А. М. СУЛИМА, В. А. ПОДЗЕЙ

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

На эксплуатационные свойства деталей машин, наряду с геометрическими параметрами поверхности, большое влияние оказывает физико-механическое состояние поверхностного слоя: деформационное упрочнение и остаточные напряжения, возникшие при обработке. Эти параметры качества поверхности определяют статическую и динамическую прочность деталей, коррозионную стойкость, сохранение первоначальной точности их в процессе эксплуатации.

Важнейшая задача, стоящая в настоящее время перед машиностроителями,—научиться управлять формированием свойств поверхностного слоя с учетом особенностей работы деталей в машине. Однако это возможно только на основе глубокого изучения механизма деформационного упрочнения (наклепа), остаточных напряжений и сопутствующих явлений в процессе обработки.

В данной статье кратко изложены результаты работ, проведенных в целях объяснить механизм формирования свойств поверхностного слоя с позиции физики твердого тела.

Упруго-пластическая деформация поверхностного слоя, вызванная действием сил резания и локальным нагревом в процессе обработки, изменяет его структуру и свойства. В кристаллической решетке возрастает число дефектов—увеличивается плотность дислокаций и концентрация вакансий. Зерно дробится на фрагменты и блоки с изменением их взаимной ориентации. У поверхности зерна измельчаются и вытягиваются. Металл поверхностного слоя подвергается деформационному упрочнению—наклепу. Неоднородность упруго-пластической деформации по глубине поверхностного слоя, а также структурно-фазовые изменения вызывают появление в детали остаточных макро- и микронапряжений.

Для оценки эксплуатационных свойств детали с учетом условий работы в машине предлагается пользоваться расширенной классификацией параметров качества поверхностного слоя (табл. 1). Наряду с известными критериями шероховатости и волнистости, глубины и степени наклепа, она включает: параметры решетки, плотность дислокаций и концентрацию вакансий; размеры блоков, фрагментов и их взаимную ориентацию, что характеризует искаженность кристаллической решетки и субструктуру металла; макро- и микронапряжения.

В настоящее время имеются довольно подробные данные о качест-

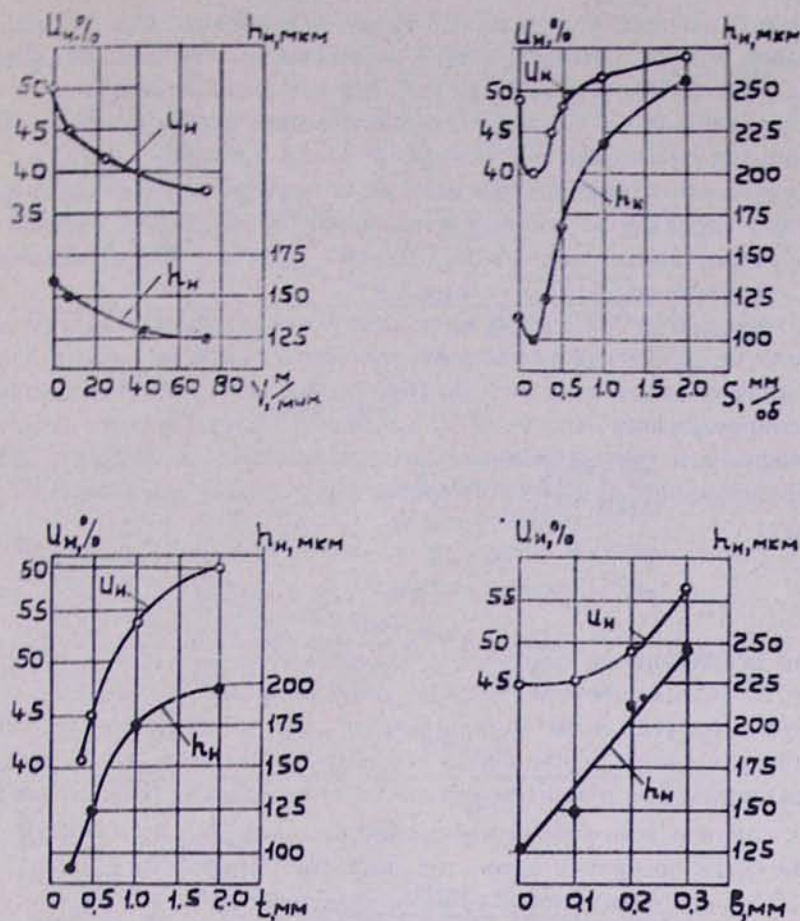
Классификация параметров качества поверхностного слоя				
Группа параметров	Подгруппа параметров	Наименование параметров	Обозначение	Единицы измерения
Неровность поверхности	Шероховатость	Высота неровностей	R_z	мк
		Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a	"
		Среднее квадратическое отклонение профиля	R_{eq}	"
		Шаг неровностей	$L_{ш}$	"
		Радиус окружения впадины неровностей	$r_{ш}$	"
	Волнистость	Высота волнистости	$H_{вл}$	"
		Шаг волнистости	$L_{вл}$	мм
	Направление неровности	Угол между направлением неровностей и направлением действия внешней нагрузки	$\alpha_{ш}$	градусы
		Степень деформации отдельных зерен	$\varepsilon_{эр}$	%
	Степень деформации	Степень деформации слоев (совокупности зерен)	ε	"
Физическое состояние поверхностного слоя	Деформац. упрочнение (наклеп). Субструктура	Глубина наклепа	h_n	мк
		Степень наклепа	U_n	%
		Градиент наклепа	$U_{гн}$	кг/мм ²
		Размеры фрагментов	e_f	мк
		Размеры блоков	$e_{бл}$	"
	Кристаллическая структура	Угол разориентировки фрагментов	$\alpha_{ф}$	градусы
		Угол разориентировки блоков	$\alpha_{бл}$	"
		Параметр решетки	a	Å
		Плотность дислокаций	ρ	см ⁻²
		Концентрация вакансий	C	"
Напряженность поверхностного слоя	Остаточные напряжения	Технологич. макронапряжения	$\sigma_{ост}$	кг/мм ²
		Микронапряжения	$\sigma_{ост}$	"
		Напряжения 3-го рода	$\sigma_{ост}$	"

ве поверхностного слоя (R_a , h_n , U_n , $\sigma_{ост}$) деталей из различных металлов, изготовленных методами механической и электрохимической обработки. Наличие этих данных позволяет технологу, в зависимости от требований к качеству поверхности, выбрать соответствующие методы и режимы обработки.

В рамках данной статьи основное внимание уделено физико-механическому состоянию поверхностного слоя, устойчивости параметров его качества в процессе эксплуатации; механизму формирования физико-механических свойств на финишных операциях технологического процесса и способам его регулирования.

Деформационное упрочнение поверхностного слоя деталей оценивается измерением микротвердости поверхности косых срезов. На рис. 1 для примера показано изменение глубины и степени наклепа в зависимости от режимов при точении жаропрочного сплава ЭИ437А.

Состояние наклепанного металла термодинамически неустойчиво. При нагревании происходит восстановление его исходной структуры, в связи с чем уменьшается внутренняя энергия наклепа. Проведенные нами исследования показывают, что при изотермическом нагреве в вакууме в интервале температур 700°—1000°С жаропрочные сплавы

Рис. 1. Изменение h_n , U_n от V , S , t , b при точении сплава ЭИ437А.

(ЭИ617, ЭИ826, ЭИ929), титановый сплав ВТ9 и сталь ЭИ961 в интервале 400° — 700°C заметно разупрочняются.

Изменение степени наклепа может быть описано уравнением (1):

$$U_n = C_1 \cdot t^{x_1} \cdot T^{y_1}, \quad (1)$$

В уравнении (1) коэффициент C_1 и показатели степени x_1 и y_1 для различных сплавов следующие:

Марка	C_1	x_1	y_1
ЭИ617	$5,503 \cdot 10^{12}$	-3,88	-0,08
ЭИ826	$1,147 \cdot 10^{12}$	-3,66	-0,07
ЭИ929	$4,779 \cdot 10^{10}$	-3,16	-0,07

На основе полученных данных можно назначить режимы изотермического нагрева (в вакууме или защитной среде) для создания по-

верхностного наклепа у детали определенного уровня. Так, например, для сплавов ЖС6К, ЭИ437Б и ВТ9 оптимальная степень наклепа в пределах от 3 до 6%. Таким образом, для конкретной детали и заданных эксплуатационных условий технологическим путем можно обеспечить наиболее благоприятное состояние поверхностного слоя.

С повышением температуры нагрева оптимальная величина деформационного упрочнения уменьшается, а при температуре, близкой к началу рекристаллизации, положительный эффект деформационного упрочнения почти полностью исчезает.

Многочисленные опыты по изучению влияния поверхностного наклепа после механической обработки на усталостную прочность и коррозионную обработку их результатов позволили установить зависимость сопротивления усталости от глубины поверхностного наклепа. Эта зависимость для жаропрочных сплавов ЭИ617, ЭИ826 и ЭИ929 после фрезерования, шлифования и обкатки роликом описывается уравнением [2]:

$$\sigma_{-1} = A_n \cdot h_n^{\beta_0} \quad (2)$$

Для испытаний на базе $N=10^6$ циклов — $A_n = 49,12$ и $\beta_0 = -0,089$; на базе $N=10^8$ циклов — $A_n = 37,96$ и $\beta_0 = -0,096$.

Результаты этих испытаний показали, что деформационное упрочнение поверхностного слоя после обработки резанием металлическим или абразивным инструментом снижает сопротивление усталости жаропрочных сплавов при рабочих температурах, так как при этом деформация металла поверхностного слоя достигает предельного значения и заведомо больше оптимальной.

Усталостные испытания образцов при рабочей температуре производились на магнитоэлектрическом вибростенде с частотой нагружения 3—5 кГц.

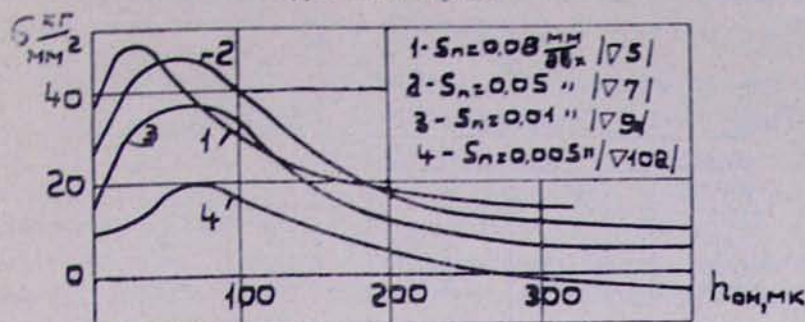
Остаточные макронапряжения, возникающие в поверхностном слое при обработке на финишных операциях, имеют разнообразное распределение по глубине. На рис. 2 приведены эпюры распределения макронапряжений после шлифования сплава ЭИ617.

Распределение $\sigma_{ост}$ определяется, в основном, преобладающим действием теплового фактора и зависит от характера контакта между обрабатываемой поверхностью детали и инструментом.

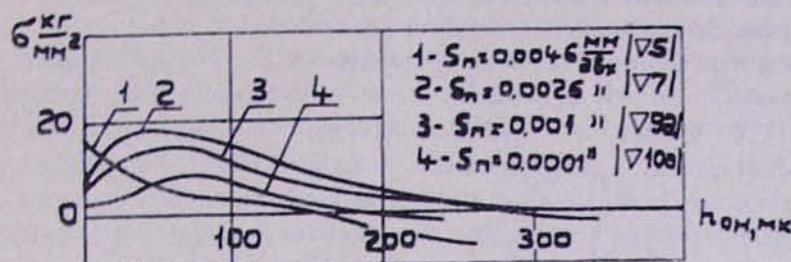
Остаточные напряжения могут оказывать заметное влияние на прочность деталей с концентраторами напряжений.

Известно также, что макронапряжения оказывают влияние на коррозионную стойкость и износоустойчивость. Если деталь работает в условиях высоких температур, то с течением времени происходит релаксация макронапряжений, а стало быть, и коробление ее. Таким образом, в этом случае вредными становятся как растягивающие, так и сжимающие макронапряжения.

Круг, вдоль образца



Лента, вдоль образца



Лента, поперек образца



Рис. 2. Распределение макронапряжений после шлифования сплава ЭИ617.

Все это вызывает необходимость нормировать технологические остаточные напряжения для ответственных деталей машин.

Релаксация технологических макронапряжений в деталях из жаропрочных сплавов и сталей зависит от температуры, продолжительности нагрева и степени деформационного упрочнения поверхностного слоя.

С повышением температуры и увеличением степени наклепа скорость релаксации возрастает.

Зависимости релаксации технологических макронапряжений ($\sigma_{\text{отак}}$) от температуры и продолжительности изотермического нагрева (в ваку-

уме) обобщены; их можно выразить корреляционным уравнением вида

$$\sigma_{0\max} = A t^{\alpha} \cdot T^{\beta} \cdot U_n^{\gamma} \quad (3)$$

Значения коэффициентов и показателей степени в уравнении (3) для исследованных жаропрочных сплавов следующие:

Марки сплавов	$\sigma_{0\max} \sim t, T, U_n$			
	α	β	γ	
ЭИ617	$8.772 \cdot 10^{14}$	-5.164	-0.111	0.807
ЭИ826	$3.002 \cdot 10^{10}$	-3.671	-0.072	0.950
ЭИ929	$3.314 \cdot 10^{20}$	-4.763	-0.151	0.304

В условиях циклического нагружения и действия высоких температур нагрева релаксация напряжений увеличивается.

Механизм формирования технологических остаточных макронапряжений очень сложный. В процессе механической обработки одновременно действуют силовой и тепловой факторы, вызывающие неоднородную упруго-пластическую деформацию поверхностного слоя, структурные изменения и т. д. Физико-механические свойства поверхностного слоя детали формируются в основном для финишной механической обработки, где чаще других методов применяется шлифование. При отделочном шлифовании превалирующее влияние в образовании остаточных макронапряжений оказывает тепловой фактор, что установлено посредством теплового моделирования [3]. Температурное поле в детали зависит от кинематики метода шлифования, режима его проведения, теплофизических свойств обрабатываемого материала и инструмента. При шлифовании кругами поле отличается высокими температурными градиентами.

Для слоев, находящихся вблизи поверхности, температура может быть определена по уравнению

$$\Theta(y, \tau) = \frac{q}{\sqrt{\pi \lambda c \gamma \tau}} \exp \left(-\frac{y^2}{4a\tau} - b\tau \right), \quad (4)$$

где $\Theta(y, \tau)$ — температура точки тела с координатой y в момент времени τ ,

q — интенсивность теплового источника,

a — коэффициент температуропроводности,

λ — коэффициент теплопроводности,

c — удельная теплоемкость,

γ — удельная плотность,

b — коэффициент теплоотдачи.

Анализируя уравнение (4), можно прийти к выводу, что некоторое изменение температуры по уровню может быть достигнуто за счет подбора режима шлифования и характеристики абразивного инструмента, определяющих интенсивность теплового источника (q). Если не припи-

мать в расчет деформации от сил резания, а также структурно-фазовые превращения, то рассмотренное температурное поле вызывает образование на поверхности растягивающих напряжений.

Механизм образования растягивающих напряжений в случае круглого или плоского шлифования периферией круга можно объяснить так [3]. В момент (τ_1), когда круг проходит рассматриваемый участок поверхности, поверхностный слой ее нагревается почти до температуры плавления, а нижележащие слои остаются «холодными». От «горячего» до «холодного» слоя температура изменяется по экспоненте. В этот момент поверхностный слой, стремясь расшириться на величину $\alpha \cdot \Theta$ (α —коэффициент линейного расширения), испытывает сопротивление со стороны нижележащих слоев, и в связи с этим в нем возникают временные сжимающие напряжения и пластическая деформация— ϵ^p . Далее, когда слой остынет ($\tau = \infty$), из-за пластической деформации (укорочения слоя) в нем образуются остаточные растягивающие напряжения.

Подобным же образом можно рассмотреть механизм формирования напряжений для случая, когда поверхностный слой прогревается при обработке на более или менее одинаковую температуру. Тогда в поверхностном слое образуются растягивающие напряжения низкого уровня или даже сжимающие макронапряжения. Такая картина может иметь место при ленточном шлифовании с постоянным в течение операции контактом инструмента с обрабатываемой поверхностью (обработка на станках ВПЛ). На рис. 3 схематически, во времени, показан механизм образования остаточных тепловых напряжений. В левой части—при обработке кругами; в правой—при обработке лентой.

Уровень остаточных напряжений в поверхностном слое и их распределение зависят в значительной степени от способа закрепления детали при обработке. Так, например, при плоском шлифовании пластины, закрепленной по краям, уровень напряжений почти вдвое выше, чем при шлифовании той же пластины с установкой ее на магнитной плите. То есть наиболее благоприятный случай, когда деталь имеет возможность расширяться при нагревании в главных направлениях. Это об-

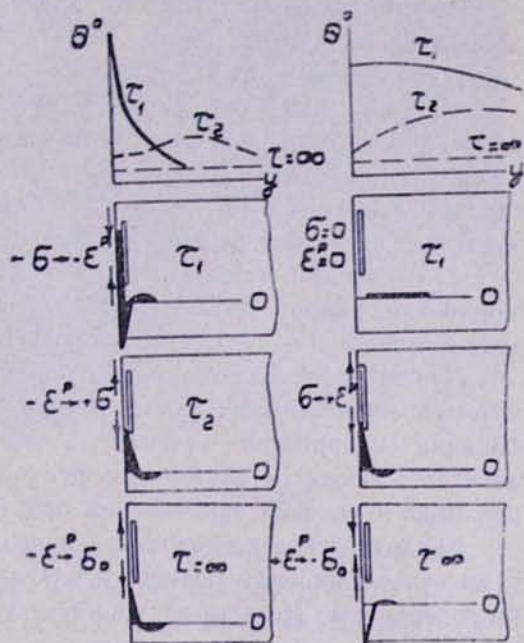


Рис. 3. Механизм образования остаточных напряжений при различном распределении температур.

стоятельство следует принимать во внимание при проектировании приспособлений.

Регулирование макронапряжений представляет собой важнейшую задачу для технолога. Эту задачу нельзя решать без учета эксплуатационных требований к детали. Так, например, если необходимо, чтобы деталь сохранила свою первоначальную точность в процессе эксплуатации, технологические макронапряжения должны быть сведены к минимуму. Изменение формы, в основном под действием температуры, из-за релаксации макронапряжений, будет в этом случае мало заметным. Для детали высоконагруженной, например для лопатки турбины, предпочтительнее наличие сжимающих напряжений на поверхности. Как известно, разрушению предшествует появление трещин. Они могут быть вызваны суммарным действием рабочих и растягивающих технологических остаточных макронапряжений.

Регулирование остаточных напряжений можно осуществить следующими способами:

- 1) подбором режимов и условий шлифования,
- 2) применением инструмента при шлифовании, которым может быть снижен уровень теплового насыщения детали,
- 3) изменением кинематики обработки с целью обеспечения постоянства контакта между инструментом и обрабатываемой поверхностью за время осуществления операции,
- 4) введением в технологический процесс дополнительных операций обработки, например, сквозного нагрева с последующим быстрым охлаждением.

Лучше всего удастся решить задачу регулирования напряжений путем комбинирования указанных способов. Однако к какой бы комбинации ни прибегал технолог, а это зависит от формы и размеров детали, а также от служебных функций ее, регулирование подбором режимов и условий закрепления при шлифовании всегда желательно.

Аналитическое исследование показало, что при шлифовании кругами нельзя добиться полного исключения растягивающих напряжений на поверхности. Но в то же время их уровень может быть заметно снижен.

Для этого необходимо снизить абсолютную температуру и температурный градиент в процессе обработки. При круглом и плоском шлифовании это может быть достигнуто за счет уменьшения интенсивности теплового источника q , повышения теплоотдачи в окружающую среду и инструмент. В этих целях следует использовать более мягкие круги с открытой структурой, уменьшить глубину резания и повысить (до определенных пределов) скорость шлифуемой детали. При этом желательно применить смазочно-охлаждающую жидкость, обладающую хорошими смазочными свойствами и высоким коэффициентом теплоотдачи. Однако, прибегая к указанному способу, нельзя забывать о производительности шлифования.

В настоящее время в авиационной промышленности при шлифова-

нии применяются круги с прерывистой рабочей поверхностью [4]. На рис. 4 показаны шлифовальные круги с прорезами.

Идея заключается в том, чтобы за время контакта выступа инструмента с изделием максимальная температура не превысила заданного уровня. При этом имеется в виду, что протяженность прорези

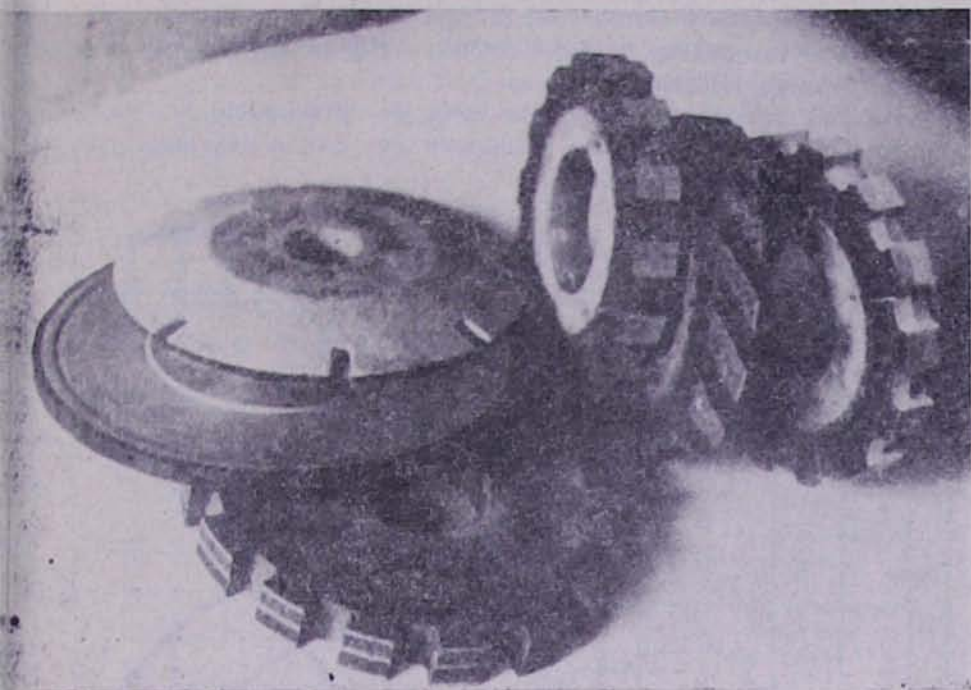


Рис. 4. Круги с прерывистой рабочей поверхностью.

является достаточна для того, чтобы поверхность почти полностью охлаждалась. Опыты показали, что такие круги по производительности не уступают обычным. При шлифовании обычными кругами температура может достигать почти температуры плавления, а кругами с прерывистой рабочей поверхностью—значительно более низкого уровня. В расчете, например, для определения длины режущего выступа удобнее иметь дело с относительными значениями температур— $\Theta_{отн}$, т. е. отношением температуры прерывистого шлифования к максимальной температуре шлифования кругами со сплошной рабочей поверхностью. Относительной температурой— $\Theta_{отн}$ можно задаться из условий получения заданного качества поверхности. Например, $\Theta_{отн}$ может равняться 0,7; 0,5 или 0,4 и лимитирована условиями появления ожогов или высокого уровня растягивающих напряжений, при которых возможно образование трещин.

Задавшись значениями $\Theta_{отн}$, расчетным путем можно определить длину режущего выступа по формуле

$$l_{\text{выст}} = \frac{4\pi D n a x}{V_{\text{изл}}^2}, \quad (5)$$

где D — диаметр круга,

n — число оборотов круга,

a — коэффициент температуропроводности,

$V_{\text{изл}}$ — скорость изделия,

x — безразмерный комплекс, зависящий от $\theta_{\text{отп}}$ (рис 5).

Протяженность прорези в большинстве случаев может быть принята равной размеру выступа.

На рис. 6 показаны распределения микротвердости и остаточных напряжений при шлифовании обычными и прерывистыми рабочими поверхностями.

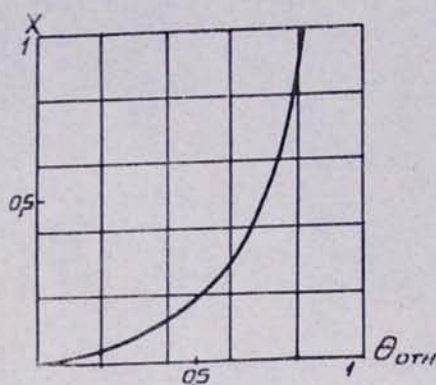


Рис. 5. Зависимость x от $\theta_{\text{отп}}$.

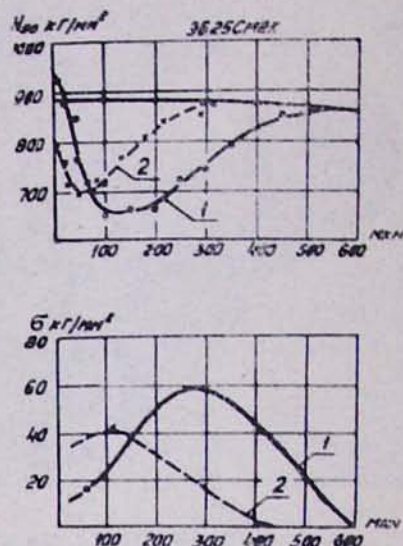


Рис. 6. Микротвердость и остаточные напряжения (14ХГСН2МА) после шлифования обычным (сплошная) и прерывистым (пунктир) кругами. $V_{\text{кр}}=25 \text{ м/сек}$

$t=0,05 \text{ мм}$, $V_{\text{дет}}=8 \text{ м/мин}$.

Физико-механическое состояние поверхностного слоя можно существенно улучшить путем применения абразивных (особенно водостойких) лент. Основное значение имеет здесь постоянство контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, а значит обеспечение условий, при которых температура по глубине поверхностного слоя более или менее выровнена. Механизм образования остаточных напряжений при этих условиях был рассмотрен ранее (рис. 3).

По этому принципу работают, например, станки ВПЛ для обработки пера лопаток. Деталь совершает осциллирующие движения в двух перпендикулярных направлениях с частотой около 50 гц и амплитудой

0,5—0,8 мм. В контакте со всей поверхностью пера лопатки находится лента.

Хорошие результаты могут быть получены при использовании алмазных и боразоновых (эльборовых) кругов благодаря высокой режущей способности их и теплопроводности. Расчетами и экспериментами установлено, что температура поверхностного слоя изделия при алмазном и эльборовом шлифовании значительно ниже, чем при абразивном [5]. При этом характер температурных полей благоприятнее, если иметь в виду их влияние на физико-механическое состояние поверхностного слоя детали. На рис. 7 приведено сравнение максимальных и моментных температур по глубине слоя в зависимости от фактической глубины резания.

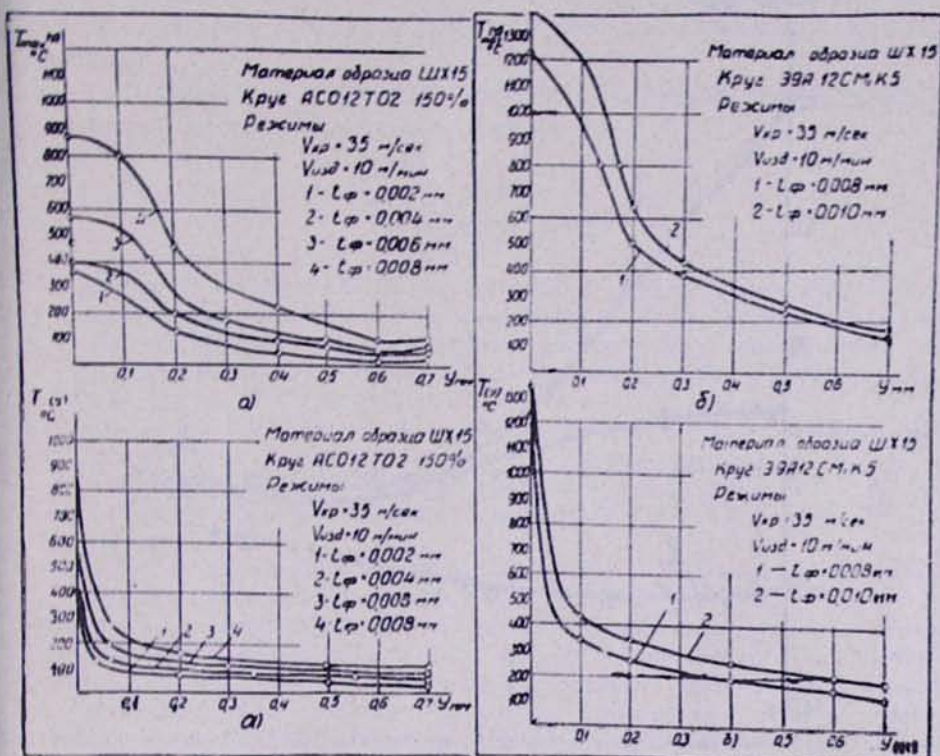


Рис. 7. Распределение температур при шлифовании:
а) алмазными кругами, б) абразивными кругами.

Регулирование остаточных напряжений можно осуществить сквозным нагреванием детали с последующим быстрым охлаждением. Этот способ обладает рядом преимуществ: во-первых, быстрое охлаждение с невысокой (несколько ниже температуры отпуска) температурой не приводит к отпускной хрупкости, к чему склонны многие марки сталей; во-вторых, при применении этого способа не наблюдается окисления, рекристаллизации и наклепа и, в-третьих, такое регулирование не ве-

дет к снижению жаропрочности, как это имеет место, например, при отпуске сплава ЭИ929 с температурой 1050°C.

Механизм образования сжимающих напряжений можно проследить на рис. 3—правая часть. Характер же их распределения показан на рис. 8. Кривая 1—напряжение в слое образца из сплава ЭИ437А после плоского шлифования периферией круга, кривая 2—напряжение в слое того же образца после сквозного нагрева с последующим охлаждением в воде, кривая 3—распределение напряжений в слое после шлифования образца, подвергнутого предварительно сквозному нагреванию с охлаждением в воде.

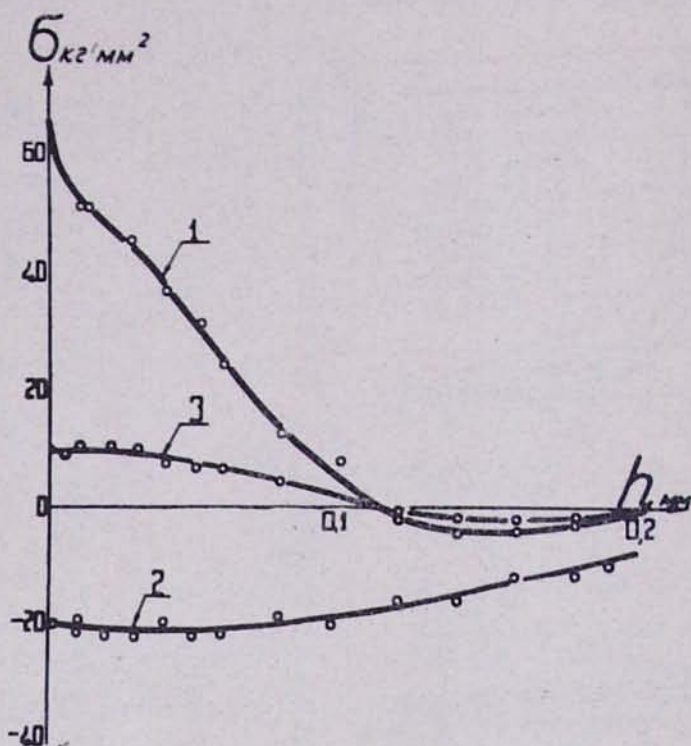


Рис. 8. Остаточные напряжения в образцах из сплава ЭИ437А. 1—после шлифования, 2—после шлифования с последующим сквозным нагревом и ускоренным охлаждением, 3—после шлифования с предшествующим сквозным нагревом и ускоренным охлаждением.

В работе [6] приведены формулы и инженерная методика для расчета тепловых остаточных макронапряжений в валах.

Применяя различные способы регулирования (виброконтактное шлифование, отпуск, сквозное нагревание с последующим резким охлаждением), желательно, чтобы начальные напряжения у поверхности после шлифования стали как можно ниже. При наличии высокого уровня «шлифовочных» напряжений приходится, например, при послед-

нем способе регулирования повышать температуру нагревания и применять более резкое охлаждение, что не всегда допустимо в связи с возможностью образования трещин и других дефектов.

Выводы

1. Физико-механическое состояние поверхности оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.
2. Состояние поверхностного слоя в процессе эксплуатации неустойчиво. Под влиянием рабочей температуры и времени происходит релаксация остаточных напряжений и снижение уровня деформационного упрочнения.
3. Физико-механическое состояние поверхностного слоя формируется в процессе обработки детали, и главным образом на финишных операциях.
4. Формированием качества поверхностного слоя можно управлять в процессе изготовления деталей машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сулима А. М., Евстигнеев М. И., Серебренников Г. З. Исследование релаксации технологических остаточных макронапряжений в деталях из жаропрочных сплавов. Сб. «Влияние методов и режимов обработки на эксплуатационные свойства деталей машин». Материалы к краткосрочному семинару 23—25. IV 1969 г., ч. II, стр. 28 : 39, Л., ЛДНТП, 1969.
2. Сулима А. М., Евстигнеев М. И., Серебренников Г. З. Влияние деформационного упрочнения на усталость теплостойких и жаропрочных сплавов при рабочих температурах и высокочастотном нагружении. Сб. Докладов на V совещании по усталости металлов в Институте металлургии им. А. А. Байкова АН СССР (24 : 28. II 1969).
3. Подзей А. В. Исследование остаточных напряжений в деталях, подвергнутых шлифованию. Сб. Трудов МАИ, № 129, 1960.
4. Подзей А. В., Якимов А. В., Бояришинов Ю. А. О работе шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью, «Вестник машиностроения», № 9, 1969.
5. Васильев А. М., Подзей В. А. Исследование тепловых явлений при шлифовании закаленных сталей алмазными кругами. Сб.: «Абразивная и алмазная обработка». М., МДНТП им. Дзержинского, 1968.
6. Подзей А. В., Серебренников Г. З. Регулирование остаточных напряжений сквозным нагревом деталей с последующим быстрым охлаждением. Сб. Трудов МАИ, № 129, 1960.