

УДК 621.9.044

А.И. ПРОМШТОВ

### ВЗАИМОСВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, ФОРМИРУЕМОГО ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Дана оценка значимости основных факторов в формировании поверхностного слоя. Показана определяющая роль силового поля, создаваемого передней поверхностью инструмента. На этой основе рассмотрена связь между напряженно-деформированным состоянием зоны стружкообразования, остаточными напряжениями, возникающими в образующемся поверхностном слое изделия, и его упрочнением.

Одним из важнейших достижений научной школы, созданной и на протяжении многих лет плодотворно руководимой профессором А.М. Розенбергом, стало создание общей механики резания металлов и раскрытие на этой основе связи между явлениями, сопутствующими процессу стружкообразования [1, 2, 3]. По результатам развернутых исследований установлены пути воздействия внешних параметров, взаимосвязи между внутренними факторами, что в совокупности определяет напряжения и деформации в зоне стружкообразования и в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента, размеры площади полного и пластического контакта, форму, размеры и ориентацию зоны стружкообразования, и такие интегральные характеристики, как усадка стружки, средний коэффициент трения, работа и силы резания.

С опорой на эти фундаментальные результаты объемными работами, проведенными в Иркутском государственном техническом университете, представилось возможным продлить связи, имеющие место в зоне стружкообразования, в направлении поверхностного слоя, создаваемого лезвийной обработкой. Как показали исследования, распространение напряжений, возникающих под воздействием передней поверхности инструмента, за линию среза представляет определяющий фактор в формировании поверхностного слоя изделия, а процессы образования стружки и поверхностного слоя представляют единую систему. Такое положение обусловлено ограниченной, в действительности, весомостью двух других факторов, причисляемых сложившимися представлениями к основным: температурного, как фактора непосредственного изменяющего свойства поверхностного слоя, и силового поля, порождаемого задней поверхностью инструмента.

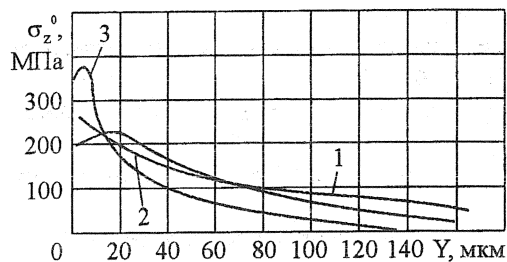


Рис. 1. Эпюры остаточных напряжений, полученные при точении стали 12X18H10T на микро- и макроскоростях:  $t = 1$  мм;  $s = 0,21$  мм/об; 1 -  $v = 0,044$  м/мин; 2 -  $v = 30$  м/мин; 3 -  $v = 180$  м/мин

Значимость температурного фактора в формировании поверхностного слоя получает свою оценку, если исходить из общих представлений о его роли в процессе стружкообразования, сформулированных в окончательном виде А.М. Розенбергом в своей последней монографии [3]. Очевидно, что если, как это показано в [3], напряжения в зоне сдвига под воздействием температуры не изменяются, то нет причин для изменения и напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя. Прямым подтверждением этому могут служить сопоставительные эксперименты, проведенные при микроскоростях, когда температура в зоне резания была равна комнатной, и при высоких скоростях резания, ко-

гда, соответственно, имели место и высокие температуры. Сравнение эпюр остаточных напряжений, отвечающих этим условиям, показывает, что расхождение между ними не

имеет принципиального характера (рис. 1). Наблюдаемые отклонения допустимо отнести в равной мере как на действие температурного фактора, так и на изменение напряженного состояния зоны стружкообразования в зависимости от скорости резания, что нашло активное отражение в изменении усадки стружки.

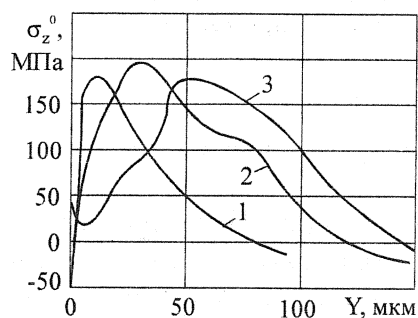


Рис. 2. Влияние износа инструмента на остаточные напряжения. Точечные стали 12Х18Н10Т:  $t = 1\text{ мм}$ ;  $s = 0,07\text{ мм об}$ ;  $v = 60\text{ м мин}$ ; 1 –  $h_3 = 0$ ; 2 –  $h_3 = 0,04\text{ мм}$ ; 3 –  $h_3 = 0,65\text{ мм}$

К заключению об ограниченном участии силового поля, создаваемого задней поверхностью инструмента, в формировании поверхностного слоя привели опыты с варьированием ширины фаски износа по задней поверхности. Только при значительном притуплении инструмента отмечается рост остаточных напряжений, но без изменения их знака и характера (рис. 2). Примечательно, что, как следует из представленного рисунка, действие задней поверхности может приводить и к увеличению остаточных напряжений растяжения вопреки довольно распространенной точке зрения, связывающей с ее действием образование сжимающих остаточных напряжений («эффект выглаживания»).

Обусловлено это преувеличением роли зоны растягивающих напряжений, порождаемых задней поверхностью. Конечно, она существует и достаточно обширная, но интенсивность напряжений в ней меньше, чем в зоне сжимающих напряжений. Поэтому дополнительные пластические деформации в ней не происходят или, во всяком случае, они несут незначительный характер. В этой связи очевидна опасность проведения аналогии между действием задней поверхности инструмента и процессом выглаживания.

Анализируя связи остаточного напряженного состояния поверхностного слоя изделия с напряженно-деформированным состоянием, имевшим место в зоне стружкообразования, можно констатировать, что в качественной форме они проявляются весьма рельефно, а в ряде случаев находят и количественное выражение.

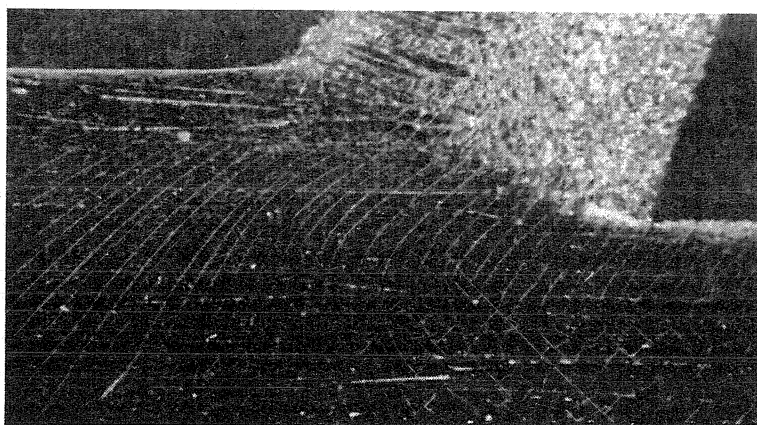


Рис.3. Корень стружки с картиной трещин. Стругание стали 0Х13:  $\gamma = +18^\circ$ ;  $a = 0,76\text{ мм}$ ;  $v = 300\text{ мм/мин}$

Привлечение метода хрупких покрытий, с использованием в качестве покрытия, наносимого гальваническим путем хрома, позволило получить корни стружек с полями деформаций для условий, изменявшихся в широких пределах (в качестве примера характер-

ный корень стружки представлен на рис.3). Как показывают деформационные картины, идущие от зоны стружкообразования траектории главных деформаций при перерезании режущей кромкой сохраняют свою ориентацию, определяя знак образующихся остаточных напряжений.

В случае свободного резания между ними устанавливается весьма простая зависимость. С допущением полагая в зоне стружкообразования деформацию плоской, имеем

$$e_z = e_2 \cdot \cos 2\omega,$$

где  $e_2$  – вторая главная деформация;

$e_z$  – деформация в направлении вектора скорости резания (тангенциальном);

$\omega$  – угол между направлениями  $e_2$  и  $e_z$ .

Поскольку при резании деформация  $e_2$  величина отрицательная [1], то при угле наклона ее траектории (линии трещины) меньше  $45^\circ$  деформация в тангенциальном направлении  $e_z$  будет сжимающей, а остаточные напряжения в этом направлении соответственно растягивающими. В том же случае, если угол  $\omega$  будет больше  $45^\circ$ , то деформация в тангенциальном направлении будет уже положительной, а остаточные напряжения – сжимающими.

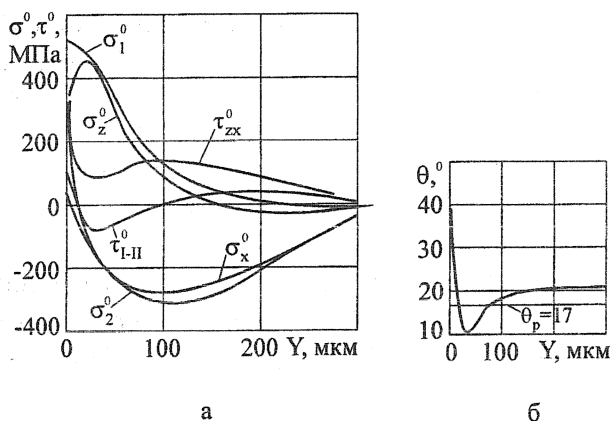


Рис.4. Характеристики остаточного напряженного состояния: а – эпюры главных  $\sigma_1^0, \sigma_2^0$ , нормальных (тангенциальных  $\sigma_z^0$  и осевых  $\sigma_x^0$ ) и касательных  $\tau_{zx}^0$  остаточных напряжений; б – угол отклонения главных осей  $\theta$  по толщине поверхностного слоя ( $\theta_p$  – среднее интегральное направление). Точение стали 12Х18Н10Т:  $\gamma = 10$ ;  $\lambda = 0$ ;  $\varphi = 90$ ;  $\varphi_1 = 15$ ;  $t = 1$  мм;  $s = 0,21$  мм/об;  $v = 30$  м/мин

Известно, что при резании в стружке появляется текстура, направление которой совпадает с главной осью деформации растяжения. Если учесть, что в непосредственной близости от режущей кромки это направление сохраняется и в поверхностном слое, то знак остаточных напряжений будет связан и с углом текстуры  $\Phi_2$ , так как  $\omega = 90^\circ - \Phi_2$ . Отсюда вытекает, что при  $\Phi_2 < 45^\circ$  следует ожидать остаточные напряжения сжатия, а при  $\Phi_2 > 45^\circ$  – остаточные напряжения растяжения. Представленные в таблице результаты экспериментов за одним исключением подтверждают это положение.

При несвободном резании связи между остаточными напряжениями в поверхностном слое изделия и напряженным состоянием зоны стружкообразования, естественно, осложняются. Тем не менее, они себя достаточно четко проявляют. Как результат

ориентации зоны стружкообразования под некоторыми углами к обработанной поверхности и направлениям формообразующих движений, в поверхностном слое формируется поле остаточных напряжений, главные оси которого также не совпадают с направлениями формообразующих движений (рис. 4). В результате по этим направлениям наряду с нормальными компонентами появляется и касательная. Касательные остаточные напряжения, как и нормальные (тангенциальные и осевые) могут быть и положительными, так и отрицательными, а их величина, естественно, тем больше, чем больше угол отклонения главных осей от направления формообразующих движений. В свою очередь зависимость этого угла от условий обработки может быть охарактеризована следующей формулой:

$$\operatorname{tg} 2\Theta = -\frac{2 \cos \eta_1 \cdot \operatorname{tg} 2\Phi_2}{\cos^2 \eta_1 + 1},$$

где  $\eta_1$  – угол схода стружки, отсчитываемый от обработанной поверхности;  
 $\Phi_2$  – угол текстуры стружки.

Как следует из формулы, чем меньше угол текстуры и угол схода стружки, то есть чем более осложнен процесс резания, тем больше угол отклонения главных осей. Выведена эта формула из ранее использованной предпосылки, что деформированное состояние по обе стороны линии среза вблизи от режущей кромки одинаково. Поэтому она позволяет составить лишь качественное суждение о причинах изменения угла отклонения главных осей остаточного напряженного состояния при изменении характеристик резания. Тем не менее, с ее помощью получает объяснение наблюдаемое уменьшение угла отклонения главных осей с увеличением скорости резания, переднего угла и вспомогательного угла в плане, а также подачи при обратных срезах или при уменьшении главного угла в плане и подачи при прямых срезах.

Таблица

Знаки тангенциальных остаточных напряжений, определенные по углу текстуры стружки и экспериментально при точении стали 1X18H10T

Скорость резания, м/мин	Толщина среза а, мм	Передний угол $\gamma^\circ$	Угол текстуры $\Phi^\circ$	Знак остаточных напряжений	
				по текстуре	эксперим.
0,3	0,73	18	54	+	+
	0,44	18	48	+	+
	0,6	9	57	+	+
	0,15	0	40	-	+
5	0,31	18	51	+	+
	0,36	18	58	+	+
30	0,27	18	66	+	+
	0,23	9	56	+	+
	0,24	0	48	+	+
60	0,34	9	61	+	+
	0,32	0	52	+	+
	0,12	0	49	+	+

Примечательно, что, как установлено экспериментально, угол отклонения главных осей по толщине поверхностного слоя непостоянен, что согласуется с изменением ориентации зоны сдвига вдоль главной режущей кромки [4]. Ее винтообразная форма при сплошности деформируемой среды находит свое продолжение за линией среза.

Непосредственная связь между напряжениями, возникающими в зоне стружкообразования, и остаточными напряжениями может быть показана при их представлении интенсивностью напряжений, характеризующей напряженное состояние в обобщенном виде. Эта связь выражается более четко, если остаточные напряжения оценивать площадью активной части их эпюр. Происходит сглаживание погрешностей определения остаточных напряжений, присутствие которых неизбежно из-за сложности эксперимента.

Существование зависимости «интенсивность действующих напряжений – твердость деформированного тела» предопределяет и существование зависимости между интенсивностью напряжений в зоне стружкообразования и степенью упрочнения поверхностного слоя, и, как следствие, взаимосвязи между интенсивностью остаточных напряжений и степенью упрочнения. Иллюстрацией изложенному служит рис. 5.

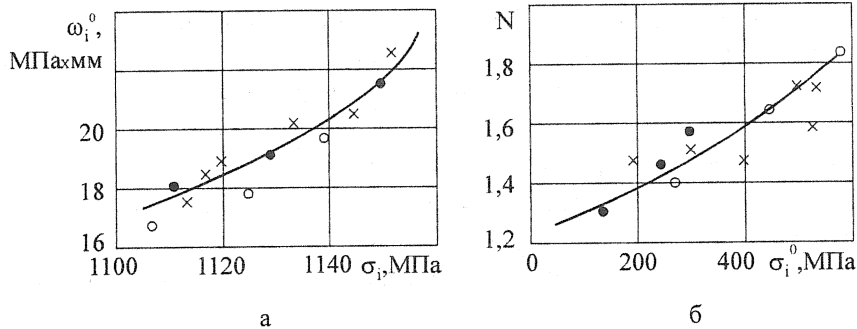


Рис. 5. Зависимость интенсивности остаточных напряжений, выраженной площадью активной части ее эшоры,  $\omega$  от интенсивности напряжений в зоне стружкообразования  $\sigma_i$  (а) и степени наклепа  $N$  от интенсивности остаточных напряжений (б). Точение стали 12Х18Н10Т:  $t = 1$  мм;  $s = 0,11 \dots 0,3$  мм/об;  $v = 5 \dots 180$  м/мин

### Выводы

1. Основным фактором, определяющим характер остаточного напряженного состояния поверхностного слоя изделия, является поле напряжений, создаваемое передней поверхностью инструмента.
2. Действие задней поверхности, проявляясь только при значительном притуплении инструмента, не вносит принципиальных изменений в вид эшор остаточных напряжений.
3. Ориентация траекторий главных деформаций, идущих от зоны стружкообразования за линию среза, определяет знак образующихся остаточных напряжений, а интенсивность напряжений в зоне стружкообразования – интенсивность остаточных напряжений и степень упрочнения поверхностного слоя. Тем самым обуславливается взаимосвязь между остаточными напряжениями и показателями упрочнения.
4. В условиях несвободного резания главные оси поля остаточных напряжений не совпадают с направлениями формообразующих движений, что требует характеризовать остаточное напряженное состояние или двумя нормальными компонентами, ориентированными по направлениям формообразующих движений, и касательной компонентой, или двумя главными компонентами и углом их отклонения от направлений формообразующих движений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. – М. – Свердловск: Машгиз, 1956. – 319 с.
2. Резание металлов и инструмент / Под ред. А.М. Розенберга. – М.: Машиностроение, 1964. – 228 с.
3. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

4. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. – Фрунзе: Мектеп, 1970. – 170 с.

Иркутский государственный технический университет

УДК 621.787

Л.А.ХВОРОСТУХИН, В.В.КУРИЦЫНА

## ФОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

В данной работе представлены результаты исследования по решению технологических проблем, имеющих место при механической обработке изделий авиационной техники из монокристаллических материалов. Предложена модель формирования параметров поверхностного слоя детали при направленном поверхностно-пластическом деформировании алмазным индентором.

В авиационных двигателях основные требования к материалам и технологиям производства деталей обусловлены тенденциями развития их конструкций – повышение рабочих температур, силовых нагрузок, повышение ресурса работы. Интенсификация производства газотурбинных двигателей и установок обострила проблему изготовления класса высоконагруженных деталей из особо прочных и жаропрочных конструкционных материалов (какими являются в частности, рабочие лопатки турбин ГТД). Это обусловлено:

- сложностью формы деталей;
- высокими требованиями по точности геометрических параметров поверхности на уровне 5-7 квалитетов, шероховатости поверхности 1,25 мкм;
- необходимостью формирования поверхностного слоя с регламентированными свойствами, высокой несущей способностью, с распределением предпочтительных остаточных напряжений сжатия.

Ведущее и перспективное место среди жаропрочных сплавов принадлежит литейным, новым направленнокристаллизованным, монокристаллическим сплавам.

Эффективным методом повышения прочности поверхностного слоя деталей является поверхностное пластическое деформирование, связанное с образованием остаточных напряжений сжатия, повышением твердости, несущей способности поверхности, коррозионной стойкости. Однако эффективность деформационного упрочнения по мере повышения температуры испытания снижается и при некоторой критической температуре прочность исходного материала (недеформированного) становится равной прочности деформированного сплава. При этом следует отметить, что во время эксплуатации в поверхностном слое монокристаллического материала лопатки, имеющем высокий уровень остаточных напряжений и деформационного упрочнения, возможно увеличение интенсивности протекания процессов рекристаллизации монокристаллического материала, что недопустимо. Для создания оптимальной степени упрочнения и остаточных напряжений после ППД целесообразно применять термообработку лопаток в виде высокотемпературного термовакуумного отжига с оптимальными режимами.

Однако одной из важных проблем в проектировании технологических процессов механической обработки деталей из монокристаллических сплавов является анизотропия физико-механических свойств материала в различных направлениях. При обработке лопа-