

УДК 621.9.011
DOI: 10.12737/18081

А.А. Бондарев, аспирант, **Я.Н. Отений**, д.т.н.,
Ю.Н. Полянчиков, д.т.н., **Д.В. Крайнев**, к.т.н.
(Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, г. Волгоград, пр. Ленина 28)
E-mail: alexander_bondarev@mail.ru

Снижение температурно-силовой напряженности процесса резания при использовании опережающего пластического деформирования

Выполнено комплексное исследование явлений сопровождающих резание конструкционных углеродистых и легированных сталей с опережающим пластическим деформированием (ОПД) по обрабатываемой поверхности. Экспериментально установлено снижение сил резания, температуры резания, усадки стружки, средней микротвердости в контактной зоне при использовании ОПД.

Ключевые слова: резание; опережающее пластическое деформирование (ОПД); сила; температура; дислокации; динамическая теплопроводность.

A.A. Bondarev, Post graduate student, **Ya.N. Oteny**, D.Eng.,
Yu.N. Polyanchikov, D.Eng., **D.V. Krainev**, Can.Eng.
(Volgograd State Technical University
400005, Russia, Lenin Avenue, 28)

Reduction of temperature-power stress in cutting process using leading plastic forming

The complex investigation of phenomena accompanying structural carbon and alloyed steel cutting with leading plastic forming (LPF) of the surface machined is carried out. The reduction of cutting force, cutting temperature, chips shrinkage, mean micro-hardness in a contact area at the use of the LPF is established experimentally.

Keywords: cutting; leading plastic forming (LPF); force; temperature; dislocation; dynamic thermal conductivity.

Снижение температурно-силовой напряженности процесса резания является способом повышения эффективности механической обработки. Представленная задача может быть решена за счет использования опережающего пластического деформирования (ОПД) при резании. Сущность комбинированной обработки заключается в совмещении двух процессов – предварительного поверхностного пластического деформирования материала заготовки, создающего необходимые глубину и степень наклепа, и последующего съема упрочненного металла в виде стружки. Тем самым создаются условия, способствующие по-

вышению эффективности механической обработки.

Исследованиями обнаружено, что применение ОПД при точении позволяет повысить стойкость режущего инструмента до 2,5 раз и производительность процесса (увеличение скорости резания при фиксированной стойкости режущих пластин) до 1,5 раз по сравнению с традиционным точением. В данной статье представлены результаты исследования механизма снижения сил и температуры резания при обработке с ОПД с позиций дислокационных представлений о резании металлов [2], закономерностей высокоскоростного пластического деформирования в зонах стружко-

образования и контактного взаимодействия [3], теплофизики процессов механической обработки [1].

Методика проведения исследований.

Экспериментальные исследования выполнялись для полуставного и чистового точения сталей твердосплавным инструментом. Комбинированная обработка выполнялась с использованием приспособления для точения с ОПД. Для определения режима осуществления ОПД использовалась характеристика комбинированной обработки – «коэффициент ОПД»:

$$K_{\text{опд}} = \frac{h_{\text{накл}}}{t}, \quad (1)$$

где $h_{\text{накл}}$ – глубина наклепанного слоя, созданного на этапе ОПД, мм; t – глубина резания, мм.

Измерения сил резания производились посредством динамометра ДКМ 2010 («TeLC», Германия), интегрированного с ПК. Микротвердость на корнях стружки определялась при помощи микротвердомера ПМТ-3. Величина температуры резания оценивалась посредством замеров термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) естественной термопары «режущий инструмент–заготовка» и фиксации температуры твердосплавной СМП методом искусственной термопары. Сигнал термо-ЭДС регистрировался цифровым осциллографом PCS500 («Velleman instruments», Тайвань). Производилась обработка полученных данных посредством программного обеспечения ПК.

Для замеров температуры режущего клина в твердосплавных СМП посредством электроэрозионной обработки были созданы глухие полости, в которых размещался датчик (спай) искусственной термопары. На основе полученных данных о температуре нагрева объемов твердого сплава при традиционном точении и точении с ОПД в идентичных условиях и режимах резания определялась мощность источника тепловыделения, действующего на передней поверхности инструмента, по методике А.Н. Резникова расчета тепловых полей в системах механической обработки [1]. Для исследования теплопроводности образцов обрабатываемых материалов, изготовленных по специальной методике, использовался прибор для измерения теплопроводности КИТ-02Ц, интегрированный с ПК.

Результаты исследования. Согласно схеме, представленной на рис. 1, ОПД создает в поверхностном слое обрабатываемой детали упрочненный слой определенной глубины и степени наклепа, характеризующийся боль-

шей плотностью несовершенств кристаллической решетки (дислокаций) по сравнению с материалом в исходном состоянии.

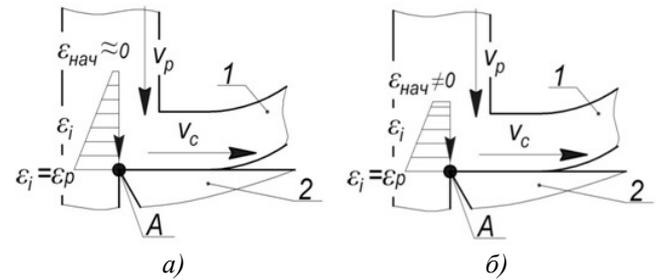


Рис. 1. Схема пластического деформирования и разрушения обрабатываемого материала, сопровождающих отделение срезаемого слоя, при точении:

a – традиционное точение; *б* – точение с ОПД; 1 – сходящая стружка; 2 – режущий клин; А – очаг разрушения; v_p – вектор скорости резания; v_c – вектор скорости перемещения стружки; $\epsilon_{\text{нач}}$ – начальная степень деформации обрабатываемого материала; ϵ_i – текущее значение степени деформации; ϵ_p – значение степени деформации обрабатываемого материала, соответствующее его разрушению

Отсюда следует, что частицы металла, поступающие в зону опережающего упрочнения, создаваемую режущим инструментом, обладают повышенной величиной деформации. Поэтому уменьшение величины работы, затрачиваемой на зарождение, продвижение дислокаций и доведение их плотности вблизи кромки лезвия до критического значения, соответствующего разрушению, обуславливает снижение интегральной суммы напряжений, действующих в зоне опережающего упрочнения при резании с ОПД по сравнению с традиционной обработкой. Данное явление способствует уменьшению величины реакции, приложенной к передней поверхности инструмента, т.е. тангенциальной составляющей силы резания P_z (табл. 1).

Эффект технологической наследственности при пластической деформации резанием, описанный в работе [2], служит еще одним объяснением увеличения обрабатываемости материалов при использовании ОПД.

Проявление наследственности заключается в том, что в предварительно упрочненном слое металла уже имеются источники дислокаций, а также дефекты в плоскостях скольжения, которые не потеряли способности к дальнейшему движению. Поэтому при дополнительном воздействии на металл (резание вслед за ОПД), имеющиеся источники несовершенств продолжают испускать новые дислокации, а старые продолжают перемещаться

1. Значения тангенциальной, радиальной и осевой составляющих сил резания при традиционной обработке и обработке с ОПД

Режимы и условия обработки	Традиционное точение			Точение с ОПД		
	Силы резания, Н					
	P_Z	P_Y	P_X	P_Z	P_Y	P_X
Сталь 20 – твердый сплав Т15К6; $t = 0,5$ мм; $v = 135$ м/мин; $s_o = 0,147$ мм/об. При обработке с ОПД $K_{ОПД} = 3,6$	372	347	462	218	131	298
Сталь 20ХН – твердый сплав Т15К6; $t = 0,5$ мм; $v = 135$ м/мин; $s_o = 0,147$ мм/об. При обработке с ОПД $K_{ОПД} = 2$	790	665	359	660	510	290
Сталь 30ХМА – твердый сплав Т15К6; $t = 0,5$ мм; $v = 180$ м/мин; $s_o = 0,147$ мм/об. При обработке с ОПД $K_{ОПД} = 2$	336	251	270	247	144	235

при меньшем уровне действующей нагрузки, т.е. режущим инструментом затрачивается меньшая работа на доведение их плотности до соответствующего разрушению значения.

После локального разрушения обрабатываемого материала у режущей кромки объемы металла вовлекаются в зоны вторичных деформаций на задней и передней поверхностях. Частицы, движущиеся в направлении последней, перемещаются через зоны стружкообразования (область РКМЛ на рис. 2) и контактного пластического деформирования (КПД) (область ОРКRD на рис. 2). При использовании ОПД в зоны стружкообразования C_C и упрочнения КПД C_2 поступает металл, обладающий меньшей пластичностью по сравнению со случаем традиционной обработки. Помимо этого, ранее охарактеризовано снижение уровня напряжений в зоне первичных деформаций. Указанные обстоятельства ослабляют развитие (распространение) зоны упрочнения КПД по высоте C_2 , а также обуславливают снижение уровня упрочнения (оценка по микротвердости: сталь 30ХМА – твердый сплав ВК6; $t = 1$ мм; $v = 90$ м/мин; $s_o = 0,256$ мм/об.; $K_{ОПД} = 2$) объемов зоны вторичных деформаций и, следовательно, сопротивления деформированию (рис. 3).

Известно [3] существование прямой пропорциональности между характером изменения микротвердости и сопротивлению пластическому деформированию объема металла, перемещающегося в зоне резания.

Анализ данных измерения микротвердости (см. рис. 3) на корнях стружки (сталь 30ХМА – твердый сплав ВК6; $t = 1$ мм; $v = 90$ м/мин; $s_o = 0,256$ мм/об.; $K_{ОПД} = 2$) свидетельствует об уменьшении средней величины микротвердости в области взаимодействия при использовании ОПД по сравнению с традиционным точением, что обуславливает снижение сопротивления объемов металла, претерпевающих

на себе воздействие лезвий, пластическому деформированию (рис. 4).

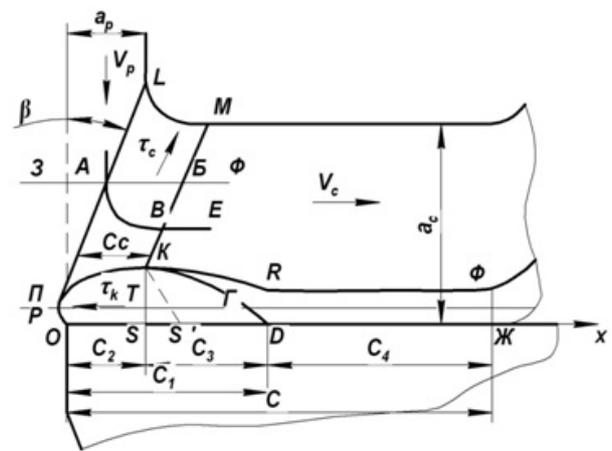


Рис. 2. Реальная схема процесса резания [2]

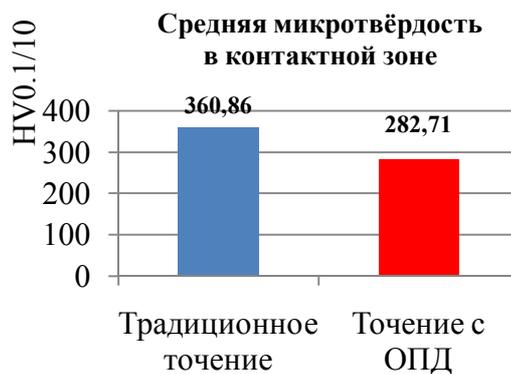


Рис. 3. Средняя микротвердость в контактной зоне на передней поверхности режущего клина

В работе [3] установлено, что процессы, протекающие на участке упрочнения зоны контактных пластических деформаций и в зоне стружкообразования, тесно взаимосвязаны и оказывают взаимное влияние друг на друга. Так, уменьшение размера участка упрочнения C_2 вызывает увеличение угла сдвига β . Исследованиями обнаружено увеличение значений

угла сдвига при точении с ОПД (см. рис. 4). Это свидетельствует об уменьшении размера участка упрочнения C_2 зоны КПД при точении с ОПД (рис. 5).

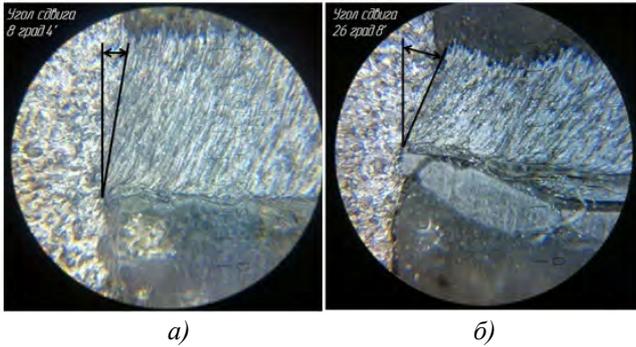


Рис. 4. Корни стружки при традиционном точении (а); точении с ОПД, $K_{\text{ОПД}} = 2$ (б)

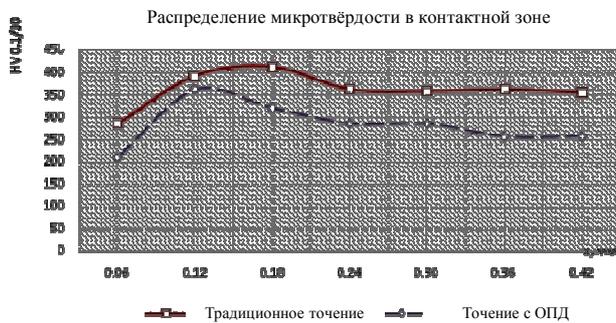


Рис. 5. Распределение микротвердости в контактной зоне на передней поверхности режущего клина на расстоянии 10 мкм от последней при традиционном точении и точении с ОПД

В работе [3] представлен механизм формирования касательной F и нормальной N нагрузок, действующих на режущий клин. При постоянной ширине срезаемого слоя F и N определяются площадями S_τ и S_σ между кривыми закономерностей распределения контактных нормальных $\sigma = f(x)$ и касательных $\tau = f(x)$ напряжений по длине взаимодействия и осью абсцисс (рис. 6). Решающее влияние на площадь S_τ и, следовательно, на нагрузку F оказывают значения контактных касательных напряжений на границе участков упрочнения и разупрочнения τ_{C_2} , размеры пластического C_1 и полного контактов C . С увеличением этих характеристик величина F растет. Площадь S_σ главным образом зависит от размеров областей C_2 и C (с их увеличением нагрузка N растет) и от уровня нормальных напряжений σ на участке упрочнения, формируемого процессами, протекающими в зоне стружкообразования. Снижение величины касательных напряжений τ_c в указанной зоне (см. рис. 2) и увеличение угла сдвига β способствует уменьшению напряжений σ .

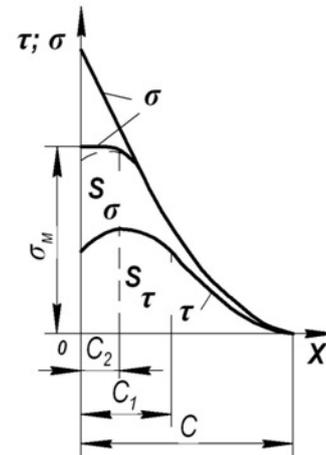


Рис. 6. Закономерности распределения нормальных σ и касательных τ контактных напряжений по длине взаимодействия

Как отмечалось ранее, уменьшение величины работы, затрачиваемой на зарождение, продвижение дислокаций и доведение их плотности вблизи кромки лезвия до критического значения, соответствующего разрушению, обуславливает снижение интегральной суммы напряжений, действующих в зоне опережающего упрочнения при резании с ОПД по сравнению с традиционной обработкой.

Облегчение контактного течения прирезцовых слоев стружки вдоль передней поверхности инструмента за счет ослабления развития (распространения) зоны пластических деформаций, уровня контактных касательных напряжений и увеличения угла сдвига способствует снижению осевой PX и радиальной PY составляющих силы резания в среднем на 15...20 % (см. табл. 1) при точении с ОПД по сравнению с традиционной обработкой.

Уменьшение сопротивления пластическому деформированию при перемещении объемов обрабатываемого материала через зоны стружкообразования и контактного взаимодействия стружки с режущим клином определяет ослабление интенсивности тепловыделения.

При измерении температуры резания методом искусственной термопары для режимов и условий обработки, соответствующих рис. 3, 4 было установлено снижение мощности источника тепловыделения в зоне резания на 17 % при точении с ОПД по сравнению с традиционной обработкой.

Анализ экспериментальных данных по замеру сигнала термо-ЭДС естественной термопары подтверждает снижение температуры резания при точении с ОПД (табл. 2).

Характер механической обработки опреде-

ляется не только интенсивностью тепловыделения, но и закономерностями теплораспределения в зоне резания. Параметром, определяющим интенсивность и направление тепловых потоков в зоне резания, является теплопроводность λ контактирующих материалов. При условии постоянства теплопроводности инструментального материала существенный интерес представляет изучение изменения теплопроводности металла срезаемого слоя, подвергнутого ОПД.

2. Значения величин Термо-ЭДС при традиционной обработке и обработке с ОПД

Режимы и условия обработки	Традиционное точение	Точение с ОПД
	Термо-ЭДС, мВ	
Сталь 30ХМА – твердый сплав Т15К6; $t = 1$ мм; $v = 90$ м/мин; $s_o = 0,256$ мм/об. При обработке с ОПД $K_{ОПД} = 2$	9,7	8,3
Сталь 30ХМА – твердый сплав ВК6; $t = 0,5$ мм; $v = 135$ м/мин; $s_o = 0,166$ мм/об. При обработке с ОПД $K_{ОПД} = 2$	11,5	10,1

Была выдвинута гипотеза о связи снижения температурно-силовой напряженности процесса резания при использовании ОПД с изменением теплопроводности металла поверхностного слоя заготовки, подвергнутой ОПД. Специально проведенные эксперименты установили явление динамической теплопроводности металла: с увеличением глубины наклепа металла происходит уменьшение величины теплопроводности металла, подвергнутого ОПД, до 35 % по сравнению с материалом, не подвергнутым предварительному пластическому деформированию (рис. 7). Данное обстоятельство способствует уменьшению интенсивности стока теплоты из очагов ее выделения.

В условиях ослабления мощности источника тепловыделения в зоне резания концентрация тепла в плоскостях скольжения способствует более активному развитию разупрочнения деформированных объемов контактной зоны при общем уменьшении температуры резания при обработке с ОПД по сравнению с традиционным точением. Описанные положения способствуют уменьшению размера участка упрочнения S_2 при сохранении длины пластического контакта S_1 зоны контактного взаимодействия резец–стружка при точении с ОПД, и, следовательно, снижению температурно-силовой напряженности процесса резания.

Подтверждением благоприятного изменения характера процессов, протекающих в зоне резания, при использовании ОПД является уменьшение значений коэффициента про-

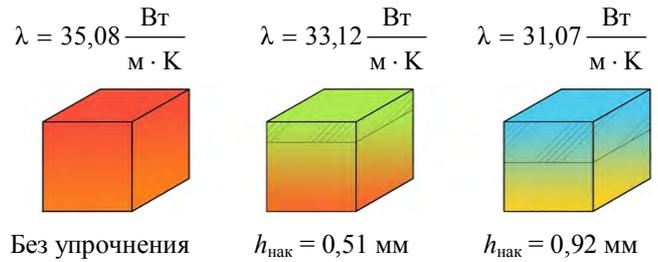


Рис. 7. Значения интегральной теплопроводности при различных глубинах наклепа

дольной усадки стружки, являющегося комплексным показателем температурно-силовой напряженности процесса стружкообразования (табл. 3).

3. Значения коэффициента продольной усадки стружки при традиционном точении и точении с ОПД

Режимы и условия обработки	Традиционное точение	Точение с ОПД
	Коэффициент продольной усадки стружки	
Сталь 20ХН – твердый сплав Т15К6; $t = 1$ мм; $v = 135$ м/мин; $s_o = 0,147$ мм/об. При обработке с ОПД $K_{ОПД} = 2$.	2,25	1,77
Сталь 30ХМА – твердый сплав Т15К6; $t = 1$ мм; $v = 90$ м/мин; $s_o = 0,256$ мм/об. При обработке с ОПД $K_{ОПД} = 2$	3,22	1,74

Выводы. Снижение температурно-силовой напряженности процесса резания при использовании ОПД обусловлено уменьшением величины работы пластического деформирования, затрачиваемой режущим инструментом на отделение срезаемого слоя, напряжений, действующих в зоне резания, снижением теплопроводности металла, подвергнутого ОПД, и соответствующим изменением характера процессов, протекающих в зонах стружкообразования и контактного взаимодействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
2. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 160 с.
3. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.

REFERENCES

1. Reznikov, A.N., *Thermal Physics of Material Machining Processes*. V.: Mechanical Engineering, 1981. pp. 279.
2. Starkov, V.K., *Dislocation Ideas of Metal Cutting*. M.: Mechanical Engineering, 1979. pp. 160.
3. Talantov, N.V., *Physical Fundamentals in Process of Cutting, Wear and Destruction of Tools*. M.: Mechanical Engineering, 1992. pp 240.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандожко