

А. Р. Ингеманссон, Н. Г. Зайцева, Д. В. Крайнев, А. А. Бондарев

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Выполнено комплексное исследование явлений, сопровождающих резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) по обрабатываемой поверхности. Разработана математическая модель, описывающая закономерности формирования шероховатости при точении с ОПД. Предложена формула для расчета среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$ , расширяющая возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки. *Математическая модель; шероховатость; точение; опережающее пластическое деформирование (ОПД); формула; расчет*

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности процесса резания материалов, в частности труднообрабатываемых, является актуальной проблемой современного машиностроения. Эта задача решается различными путями: увеличением работоспособности режущего инструмента, производительности процесса и качества получаемых изделий. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД), совмещающее стадии предварительного поверхностного пластического деформирования и последующего съема припуска на обработку режущим инструментом, является комбинированным методом обработки, позволяющим получить комплексный результат повышения эффективности процесса по перечисленным выше направлениям. Изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала после стадии ОПД обеспечивает формирование таких условий протекания физических процессов в зоне резания, которые способствуют снижению работы стружкообразования, нагрузок на режущий клин, улучшению условий контактного взаимодействия и формирования новой поверхности.

Исследование способа точения с ОПД по обрабатываемой поверхности [1] обнаружило комплексное увеличение эффективности обработки [2]. Повышенная плотность дислокаций, созданная в поверхностном слое заготовки на этапе ОПД, обуславливает снижение работы, совершаемой резцом, по доведению обрабатываемого материала до критического деформационно-энергетического состояния в области отделения стружки. Данное явление ответственно

за снижение интегральной суммы напряжений, действующих в зоне первичных деформаций, и, следовательно, за уменьшение нормальной  $P_z$  составляющей силы резания и соответствующего тепловыделения при использовании исследуемого способа по сравнению с традиционной обработкой.

При применении ОПД в области стружкообразования и упрочнения зоны контактных пластических деформаций поступает металл, обладающий меньшей пластичностью по сравнению со случаем обычного резания. Кроме этого, имеет место ослабление уровня напряжений в зоне первичных деформаций. Представленные изменения ослабляют распространение области упрочнения контактных пластических деформаций по высоте и по длине, а также обуславливают снижение уровня упрочненности объемов зоны вторичных деформаций и, следовательно, сопротивления деформированию. Облегчение контактного течения прирезцовых слоев стружки вдоль передней поверхности инструмента обуславливает снижение осевой  $P_x$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания при точении с ОПД по сравнению с традиционной обработкой. Сокращение уровня действующих напряжений (т. е. сопротивления пластическому деформированию) определяет уменьшение мощности источника тепловыделения в зоне резания при обработке с ОПД.

Снижение тепловыделения при обработке с ОПД предопределяет повышение температурно-деформационной стабильности процесса съема припуска, а именно – уменьшение частоты и амплитуды цикличности стружкообразования.

Снижение нагрева режущего клина, его силового нагружения, ослабление адгезионно-

усталостных явлений и пагубного влияния цикличности стружкообразования обуславливает повышение стойкости инструмента как с износостойкими покрытиями, так и без них (до 2,5 раз) при обработке с ОПД по сравнению с традиционным точением. Результаты исследований показали, что применение ОПД позволяет повысить производительность обработки за счет повышения скорости резания при неизменной стойкости лезвий до 1,5 раз. Уменьшение размерного износа способствует улучшению качества изделий.

Качество изготавливаемых деталей является одной из основных характеристик эффективности механообрабатывающего производства. Применительно к технологическому процессу обработки резанием следует выделить требования к точности размеров, геометрической формы и взаимного расположения поверхностей, параметрам, характеризующим их микропрофиль и состояние наружного слоя. Применение ОПД при точении является средством комплексного улучшения выходных характеристик обработки. Снижение размерного изнашивания инструмента при использовании комбинированного способа обуславливает повышение точности размеров, геометрической формы и взаимного расположения поверхностей выпускаемой продукции. Уменьшение температурно-силовой напряженности и повышение стабильности процесса съема стружки формирует улучшение напряженно-деформированного и энергетического состояния поверхностного слоя изготовленной детали.

Исследованиями установлено, что точение труднообрабатываемых коррозионно-стойких сталей с ОПД по обрабатываемой поверхности [1] позволяет значительно улучшить микропрофиль получаемой поверхности резания [2]. Так, при точении с ОПД коррозионно-стойких хромистых и сложнолегированных сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов происходило снижение значений среднего арифметического отклонения профиля Ra до 2 раз по сравнению с традиционной обработкой. Были выявлены резервы существенного повышения производительности процесса резания. Одинаковые значения Ra получались при традиционном точении на одних подачах и при резании на больших подачах предварительно продеформированного металла.

## **АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ**

На сегодняшний день отсутствие зависимостей, позволяющих спрогнозировать эффективность обработки с ОПД, является препятствием на пути применения способа в практике промышленного производства. Поэтому для определения величины шероховатости поверхности, обработанной резанием с ОПД, установления относительного повышения эффективности обработки при точении с ОПД по сравнению с традиционным точением и последующей корректировки базового технологического процесса необходимо разработать математическую модель влияния основных параметров обработки на качество получаемой поверхности. Существенный интерес представляет изучение характера влияния ОПД обрабатываемой поверхности при точении на формирование характеристик шероховатости получаемых изделий.

## **ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ФАКТОРОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для определения закономерностей процесса формирования микрогеометрии и построения модели данного процесса следует выявить факторы, оказывающие определяющее влияние на шероховатость и позволяющие управлять ею. Число аргументов должно быть минимальным и достаточным для разработки модели процесса. Факторы должны быть переменными, определяющими шероховатость поверхности и управляемыми.

Все многообразные факторы, определяющие шероховатость обработанной поверхности, можно объединить в три основные группы: причины, связанные с геометрическими параметрами режущей части инструмента, пластической и упругой деформациями обрабатываемого материала и возникновением вибраций режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

Геометрию режущей части инструмента выбирают в зависимости от вида обработки (грубое, предварительное, получистовое, чистовое точение) согласно сложившимся рекомендациям. При разработке описываемой в данной статье математической модели этот фактор принимался постоянным.

На формирование микрогеометрии поверхности также оказывают влияние вынужденные колебания системы «станок – заготовка – инструмент», возникающие в процессе резания и вызываемые действием внешних сил, и авто-

колебания системы, появление которых связано с периодическим упрочнением срезаемого слоя металла и изменением условий резания.

Вынужденные колебания системы обуславливаются дефектами отдельных механизмов станка (неточностью зубчатых передач, плохой балансировкой вращающихся частей, неудовлетворительной шивкой ремня, чрезмерными зазорами в подшипниках и др.), являющимися причиной неравномерности рабочих движений.

Вибрации лезвия режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности являются дополнительным источником увеличения шероховатости обработанной поверхности. Очевидно, что высота микронеровностей поверхности тем значительнее, чем больше удвоенная амплитуда колебания лезвия инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

В случае настоящего исследования состояние технологической системы также следует отнести к числу постоянных и не управляемых технологическими факторами. Принимается, что характер, условия резания и качество материала заготовки задаются согласно требованиям к качеству обработанных деталей, следовательно, это неизменяемые и не переменные аргументы.

В производственных условиях без особых сложностей и материальных затрат можно регулировать режимы резания, выбирать инструментальный материал. Это самые простые способы влияния на качество обработки. Таким образом, для построения модели формирования шероховатости обработанной поверхности при чистовом точении с ОПД коррозионно-стойких сталей выделяется четыре основных фактора: скорость резания, величина подачи, теплопроводность инструментального материала (как характеристика, определяющая тепловой баланс зоны резания), а также фактор влияния ОПД – КОПД.

Изменение скорости резания оказывает воздействие на температуру в зоне резания и, следовательно, трансформирует характер протекания процессов стружкообразования и контактного взаимодействия. Как следует из ряда исследований, с увеличением температуры уменьшается коэффициент внешнего трения между обработанной поверхностью и задней гранью инструмента, что приводит к улучшению микрогеометрии поверхности изготавливаемой детали.

Шероховатость обработанной поверхности металлов, обладающих пластичностью, с вариацией скорости резания изменяется примерно по тем же законам, что и усадка стружки. Следова-

тельно, при обработке пластичных металлов, регулируя скорость резания и изменяя тем самым температуру резания, возможно осуществлять активное воздействие на условия съема припуска и на механизм образования неровностей на обработанной поверхности. В работе [3] отмечается, что путем изменения только скорости резания, оставляя все остальные условия обработки неизменными, можно регулировать качество в пределах одного-двух классов шероховатости поверхности.

Рост температуры резания обуславливает снижение коэффициента усадки стружки и силы резания, уменьшаются объемы, охваченные пластической деформацией, процесс резания протекает при более благоприятных условиях, что предопределяет улучшение качества поверхности. Однако большое влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает величина подачи. Причем влияние подачи проявляется не только путем геометрического воздействия ее на форму и размеры микронеровностей, но и на условия протекания процесса пластической деформации металла в зоне резания и изменение контактной температуры, а следовательно, и условий трения взаимодействующих поверхностей [4].

Степень деформации обрабатываемого металла определяется в том числе площадью среза. С увеличением подачи возрастает объем срезаемого слоя и значения силы резания. Повышение толщины срезаемой стружки вызывает выделение большого количества тепла вследствие увеличения работы деформации, трения стружки о переднюю поверхность резца, трения задней поверхности резца о вновь образованную поверхность обрабатываемой детали.

Из физических свойств коррозионно-стойких сталей наибольшее влияние на обрабатываемость оказывает их низкая теплопроводность в совокупности с повышенной упрочняемостью и высоким уровнем напряжений, формируемых на режущей кромке. Уменьшение теплопроводности обрабатываемого материала неблагоприятно влияет на интенсивность отвода теплоты из зоны резания в изделие и стружку. Это обуславливает формирование повышенной температуры в области контакта и, следовательно, активизацию явлений адгезии и диффузии, развитие высокочастотной цикличности стружкообразования. Представленные факторы предполагают наличие колебаний сил и температур резания во времени, интенсивного схватывания контактных поверхностей и разрушения режущей части инструмента. Все это отрицательно

сказывается на качестве получаемых поверхностей.

Температура, устанавливающаяся в зоне резания и на контактных поверхностях, зависит от интенсивности тепловых источников и от условий теплораспределения. Последние в значительной мере определяются теплопроводностями обрабатываемого и инструментального материалов [5].

Теплопроводность материала лезвий является варьируемым фактором, влияющим на процесс образования шероховатости обработанной поверхности, и далее учитывается при разработке математической модели.

Исследования выполнялись для чистового точения (глубина резания  $t_p = 0,5$  мм) коррозионно-стойкой стали 20Х13 (группа 2 [6]; сортовой прокат, состояние поставки,  $\sigma_{0,2} = 440$  МПа). Инструмент был представлен сменными многогранными твердосплавными пластинами (СМП) тригональной формы  $W$  ( $\varphi = 95^\circ$ ;  $\varphi_1 = 5^\circ$ ;  $\alpha = 0^\circ$ ; (ISO 1832-1991)); радиус сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок  $r = 0,8$  мм. СМП такой геометрии являются универсальными для операций полустового и чистового точения. Эксперименты выполнялись на токарно-винторезном станке модели 1МБ3 с бесступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя. Для осуществления точения с ОПД обрабатываемой поверхности использовалось сконструированное и изготовленное приспособление. Обработка выполнялась без смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

Режим ОПД описывался предложенным коэффициентом  $K_{\text{ОПД}}$ :

$$K_{\text{ОПД}} = \frac{h_{\text{нак}}}{t_p}, \quad (1)$$

где  $h_{\text{нак}}$  – глубина наклепанного поверхностного слоя, мм;  $t_p$  – глубина резания, мм.

Принятые в исследовании натуральные и безразмерные значения факторов представлены в табл. 1.

Исследованиями выявлен экстремальный характер изменения влияния ОПД обрабатываемой поверхности на эффективность процесса точения. С увеличением  $K_{\text{ОПД}}$  до некоторой величины происходит снижение силы резания, достигая минимума при определенном отношении  $h_{\text{нак}}$  к  $t_p$  (для описанных в данной статье условий это соотношение равно 3,2).

Дальнейший рост  $K_{\text{ОПД}}$  приводит к снижению эффективности процесса. Подобное влияние отмечено для соотношения усилия дефор-

мирования и толщины резания для обработки с ОПД поверхности резания в работе [7]. Нижний уровень  $K_{\text{ОПД}}$  по экспериментам равен 0 (в данном случае процесс резания происходил без ОПД), но для построения модели принимается равным 0,001 для возможности выполнения дальнейших расчетов, включающих логарифмирование. При этом допущении глубина наклепа была бы равна 0,0005 мм, что ничтожно мало. Таким образом, эта условность не оказывает влияния на результат регрессионного анализа.

Таблица 1

#### Натуральные значения факторов

Факторы	Натуральные значения		
	-1	0	+1
Нормированное значение (уровень)	-1	0	+1
Скорость резания, м/мин	90	135	180
Теплопроводность инструментального материала, Вт/м·К	11 (ТН20)	27 (Т15К6)	50 (ВК6)
Продольная подача, мм/об	0,083	0,166	0,256
$K_{\text{ОПД}}$	0,001	1,6	3,2

#### ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследований приняты, как наиболее часто рассматриваемые, математические модели следующих спецификаций: аддитивная (линейная) и мультипликативные (степенная и показательная). Математическая модель получена посредством регрессионного анализа, выполненного на основе данных полного факторного эксперимента с двумя уровнями варьирования переменных для аддитивной модели и тремя – для мультипликативных. На основании расчетов значений коэффициента парной корреляции установлено, что выбранные переменные являются попарно независимыми и каждая из них оказывает влияние на величину функции отклика. Для оценки построенных математических моделей наиболее существенные результаты процесса, представленные в табл. 2, анализ данных которых позволяет сделать следующие выводы.

Средняя относительная погрешность (расхождение значений  $R_a$ , рассчитанных по модели и полученных опытным путем) линейной моде-

ли превышает аналогичные параметры степенной и показательной (12,73 % – линейная; 9,05 % – степенная; 9,45 % – показательная), что является недостатком. Степень влияния на шероховатость поверхности случайных факторов, выражаемая соответствующим коэффициентом регрессии, у степенной и показательной моделей равна по абсолютной величине 0,01, т. е. незначительна. У линейной модели влияние случайных аргументов характеризуется абсолютной величиной 0,3, что весьма существенно на фоне принятых в исследовании переменных. Таким образом, степенная и показательная модели облегчают дальнейший прогноз качества поверхности после традиционной токарной обработки и с ОПД, так как позволяют сделать вывод о том, что наиболее значимое влияние на шероховатость оказывают именно скорость резания, теплопроводность инструментального материала, величина подачи, характер ОПД. Сравнение степенной и показательной моделей показывает достаточное сходство результатов моделирования. Однако предпочтение следует отдать первой ввиду меньшей величины погрешности расчетов целевой функции. Коэффициенты регрессии степенной и показательной модели показывают, что на шероховатость поверхности после традиционной токарной обработки и с ОПД в порядке возрастания оказывают влияние следующие факторы: скорость резания, теплопроводность инструментального материала, характер ОПД, величина подачи. С повышением скорости резания происходит некоторое увеличение значений среднего арифметического отклонения профиля (коэффициент регрессии +0,06 для степенной модели).

Такая закономерность объясняется ростом неустойчивости процесса резания, а именно – цикличности стружкообразования, свойствен-

ной обработке коррозионно-стойких сталей, с увеличением скорости. С увеличением теплопроводности инструментального материала также происходит ухудшение шероховатости получаемых поверхностей, объясняемое влиянием теплофизических свойств контактирующих пар (инструмент-деталь) на характер протекания физических процессов в зоне резания. Влияние этого фактора (коэффициент регрессии +0,19 (степенная модель)) почти в 3 раза больше, чем скорости резания. Применение ОПД позволяет повысить качество обработанных деталей (коэффициент регрессии –0,22 (степенная модель)). С увеличением подачи в соответствии с традиционно сложившимися представлениями шероховатость получаемых поверхностей ухудшается (коэффициент регрессии +0,37 (степенная модель)).

Регрессионная математическая модель влияния основных параметров обработки резанием с ОПД на показатель среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  обработанной поверхности реализуется в виде следующей зависимости:

$$R_a = 1,33 \cdot V^{0,1} \cdot \lambda^{0,16} \cdot S_o^{0,4} \cdot K_{\text{ОПД}}^{-0,04}, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин,  $\lambda$  – теплопроводность инструментального материала, Вт/м·К;  $S_o$  – продольная подача, мм/об;  $K_{\text{ОПД}}$  – коэффициент ОПД.

Зависимость рекомендуется при скоростях резания 90–180 м/мин, теплопроводности инструментального материала 11–50 Вт/м·К, продольных подачах 0,083–0,256 мм/об, значениях коэффициента ОПД 0,001–3,2. Другие условия обработки для практического применения формулы описаны выше.

Таблица 2

Сравнение регрессионных моделей

Параметр	Спецификация модели		
	Линейная	Степенная	Показательная
Оценка влияния факторов			
Случайные факторы	–0,30	–0,01	–0,01
Скорость резания	0,12	0,06	0,07
Теплопроводность инструментального материала	0,27	0,19	0,20
Продольная подача	0,42	0,37	0,39
Коэффициент ОПД ( $K_{\text{ОПД}}$ )	–0,20	–0,22	–0,26
Достоверность адекватной модели, %	99,7	99,9	99,9
Оценка погрешности			
Стандартное отклонение	0,547	0,547	0,547
$F$ -критерий	1,861	2,014	2,014
Средняя относительная погрешность, %	12,73	9,05	9,45

## ВЫВОДЫ

1. Резание с ОПД является комплексным способом повышения эффективности точения коррозионно-стойких сталей. Изменение физических процессов, протекающих в зоне обработки, позволяет снизить температурно-силовую напряженность съема припуска и контактного взаимодействия. Данное обстоятельство способствует повышению работоспособности инструмента, качества получаемых поверхностей, производительности операций.

2. Для расширения возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки разработана математическая модель, описывающая закономерности формирования шероховатости при точении с ОПД по обрабатываемой поверхности и традиционном точении, позволяющая прогнозировать величину среднего арифметического отклонения профиля Ra получаемой поверхности для последующей корректировки базового технологического процесса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2399460 РФ, МПК В 23 В 1/00. Способ обработки деталей резанием с опережающим пластическим деформированием / Ю. Н. Полянчиков [и др.]; ГОУ ВПО ВолгГТУ. 2010.

2. **Полянчиков Ю. Н.** Повышение обрабатываемости сталей резанием путем использования опережающего пластического деформирования // Методы повышения технологических возможностей металлообрабатывающего оборудования с ЧПУ: сб. науч. тр. Уфа, 2010. С. 40–43.

3. **Петруха П. Г.** Обработка резанием высокопрочных, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей. М.: Машиностроение, 1980. 167 с.

4. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

5. **Резников Н. И.** Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов. М.: Машгиз, 1960. 199 с.

6. **Гуревич Я. Л.** Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.

7. **Ярославцев В. М.** Точение с опережающим пластическим деформированием: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ, 1991. 38 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Ингеманссон Александр Рональдович**, асп. каф. технологии машиностроения Волгоградск. гос. техн. ун-та. Дипл. магистр техники и технологии (ВолгГТУ, 2009). Готовит канд. дис. в обл. повышения эффективности обработки резанием труднообрабатываемых материалов за счет применения опережающего пластического деформирования.

**Зайцева Наталья Григорьевна**, асп. каф. автоматизации производственных процессов того же ун-та. Дипл. инженер-технолог (ВолгГТУ, 2011). Готовит канд. дис. в обл. обеспечения качества обработки сталей резанием.

**Крайнев Дмитрий Вадимович**, доц. каф. технологии машиностроения того же ун-та. Дипл. магистр техники и технологии (ВолгГТУ, 2003). Канд. техн. наук по технологии и оборудованию механической и физико-технической обработки (ВолгГТУ, 2006). Иссл. в обл. повышения эффективности обработки металлов резанием.

**Бондарев Александр Александрович**, готовит диплом бакалавра техники и технологии (специализация: технология машиностроения) в обл. повышения эффективности обработки сталей с опережающим пластическим деформированием.