

УДК 621 9.02

Беляковский В.П.¹, Крепак А.С.²

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Проведен анализ современных проблем теории резания металлов, связанных с обработкой труднообрабатываемых материалов повышенной прочности, твердости и износостойкости. Показаны пути развития теоретических методов расчета характеристик процесса резания металлов, а также новых экспериментальных способов исследований, существенно повышающих точность расчетов напряженного состояния металла в зоне резания.

Обработка резанием по сравнению с другими методами обработки имеет ряд преимуществ. К ним относятся универсальность, простота эксплуатации и технологическая маневренность, малая энергоемкость при достаточно высокой производительности, возможность получения деталей различных форм и размеров с высокой точностью и качеством поверхности, стабильность получаемых эксплуатационных свойств деталей.

Технический прогресс в машиностроении и дальнейшее развитие новых отраслей техники потребовали применения новых конструкционных материалов, обладающих повышенными прочностными характеристиками или особыми физическими свойствами. Обработка этих материалов имеет свои характерные особенности, качественно отличающиеся от обработки обычных конструкционных материалов. Обрабатываемость резанием труднообрабатываемых сталей и сплавов зависит прежде всего от их химического состава, который в сочетании с термообработкой определяет эксплуатационные характеристики этих материалов: жаропрочность, коррозионную стойкость, механическую прочность, износостойкость и т.д. Высокая степень легирования сталей и сплавов оказывает большое влияние на их обрабатываемость ввиду образования на основе легирующих элементов дисперсных фаз, упрочняющих твердый раствор сплава, или таких весьма твердых составляющих структуры, как карбиды, нитриды, интерметаллидные соединения, которые интенсивно изнашивают режущие инструменты.

В связи с увеличением номенклатуры обрабатываемых материалов все больше проявляются погрешности расчетов, связанные с приближенностью эмпирических формул, применяющихся для расчета скорости резания, сил резания и других характеристик. В настоящее время большое внимание уделяется развитию теоретических методов расчета характеристик процесса резания. Можно указать на решение следующих проблем: разработка кинематики процесса резания, установление основных факторов, непосредственно влияющих на процесс резания; раскрытие основных закономерностей вибрации при резании металлов и др.

Повышение теоретического уровня исследований процесса резания металлов связано с разработкой новых методов теоретического и экспериментального исследования напряженного состояния зоны стружкообразования. Большое значение имеют эти исследования для случаев косоугольного резания, которое широко используется для создания высокопроизводительных инструментов. При косоугольном резании вектор скорости резания не перпендикулярен к режущей кромке. В этом случае векторы скорости резания, скорости сдвига и скорости стружки образуют плоскость стружкообразования, расположение которой в зоне резания зависит от большого числа факторов. Определение фактического положения плоскости стружкообразования в зоне резания и расчет характеристик напряженного состояния металла в этой плоскости

¹ ПГТУ, канд. техн. наук, проф.

² ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

связаны с большими трудностями из-за отсутствия надежных способов экспериментального наблюдения и измерения этих характеристик.

На кафедре "Металлорежущие станки и инструменты" предложены способы определения направления схода стружки по передней поверхности инструмента, методы измерения толщины срезаемого слоя и толщины стружки в зоне стружкообразования, позволяющие рассчитать величины усадки стружки, характеризующей напряженное состояние металла, направление и величину максимальных деформаций стружки. Один из способов предусматривает использование составных образцов [1]. Увеличение точности определения положения плоскости стружкообразования обеспечивается наличием постоянной базы для отсчета углов схода стружки, роль которой выполняет плоскость разреза образца. Полученный в результате эксперимента корень стружки позволяет измерить размеры срезаемого слоя и стружки и рассчитать параметры напряженного состояния металла в зоне стружкообразования. Предложен также способ измерения усадки стружки, который заключается в том, что в обрабатываемом образце выполняется отверстие малого диаметра [2]. Под действием сил резания происходит деформация стружки и ее элемент, срезанный с образца, имеет отверстие в виде овала. По соотношению первоначального размера (до срезания) отверстия в образце и размера отверстия, полученного в стружке, определяют усадку в процессе резания. Этот способ позволяет измерить усадку в любом сечении стружки, а также определить направление максимальных деформаций стружки.

Существенным вкладом в теорию резания металлов является разработка математических моделей процесса резания для различных операций механической обработки металлов. На кафедре разработаны математические модели процессов нарезания зубьев червячными модульными фрезами, развертывания точных отверстий в нержавеющей и жаропрочных сталях, обработки цилиндрических поверхностей торцовыми фрезами, операций плазменно-механической обработки деталей высокой твердости. Математические модели позволили оптимизировать параметры обработки, конструктивные элементы и геометрические параметры режущей части инструментов по критериям максимальной стойкости и необходимой точности обработки.

Разрабатываются научно обоснованные критерии оптимизации геометрических параметров режущего лезвия. Стойкость является интегральным критерием оптимизации, не позволяющим в общем случае выделить основные закономерности влияния отдельных параметров. Прочность режущего лезвия, его формоустойчивость под действием высоких температур и давлений, интенсификация теплоотвода и другие факторы являются критериями оптимизации. Под руководством авторов разработаны способы определения сил на контактных поверхностях режущего инструмента [3], способ определения загрузки зубьев червячной фрезы [4]. Исследования с использованием этих способов позволяют более точно установить взаимодействие многих факторов экспериментальными измерениями взамен ранее применяемых приближенных. Например, разработанный способ измерения сил, действующих на задних поверхностях инструментов, позволяет получить экспериментальные данные вместо метода экстраполяции опытных зависимостей. Практическое определение загруженности отдельных участков режущей кромки позволяет создавать инструменты с более равномерной загрузкой лезвий, что существенно увеличивает стойкость.

Кафедрой разрабатываются научные рекомендации по оптимизации геометрических параметров режущей части инструментов, что позволяет в дальнейшем создавать прогрессивные конструкции режущих инструментов. Экспериментальными исследованиями установлено, что оптимизация геометрических параметров должна производиться при одновременном их варьировании. Каждому углу наклона зуба соответствует определенное сочетание передних и задних углов, обеспечивающих наибольшую стойкость инструмента. Следует отметить, что для фрез с оптимальными сочетаниями этих параметров угол заострения остается постоянным. Это поло-

жение является действительным для режущих инструментов, у которых геометрические параметры определяются стойкостным фактором, а не точностью, технологичностью и др.

Исследованиями установлено, что при цилиндрическом фрезеровании с увеличением угла наклона лезвия растет стойкость инструмента, достигая максимума при определенной его величине. При дальнейшем увеличении последнего стойкость уменьшается. Такая зависимость обусловлена изменением соотношения удельных работ деформации и трения. Однако определение оптимальных величин этого угла во многих случаях представляет большую сложность для быстрорежущих и особенно оснащенных твердым сплавом цилиндрических фрез. Кроме того, применение фрез с принятыми геометрическими параметрами является эффективным только для конкретных условий обработки материалов с определенными физико-механическими свойствами.

Весьма остро стоит вопрос об управлении геометрией инструментов в процессе резания. Одним из путей, ведущих к возможности управления, является сообщение дополнительного движения режущей кромке (вращательного либо поступательного), что приводит к изменению в широких пределах угла наклона режущей кромки и связанных с ним переднего и заднего углов. Возможность изменения скорости дополнительного движения по определенному закону позволяет изменять рабочую геометрию инструмента с целью ее оптимизации. Для управления кинематическими параметрами предложен новый способ фрезерования с дополнительным осевым движением инструмента [5]. Этот способ осуществляется таким образом, что при нахождении зуба фрезы на поверхности резания инструменту кроме вращения также сообщается поступательное движение вдоль его оси, и фреза, после выхода из зоны резания очередного зуба, возвращается в исходное положение. Осевое движение инструмента отклоняет вектор скорости вращательного движения на дополнительный угол, что изменяет значение кинематического угла наклона режущей кромки и позволяет получить оптимальные кинематические сочетания геометрических параметров с учетом конкретных физико-механических свойств обрабатываемого материала без переточек или замены инструмента. Для осуществления этого способа спроектировано и изготовлено специальное устройство, обеспечивающее дополнительное осевое движение инструмента, программносителем в котором является дисковый кулачок.

Для повышения точности обработки имеет значение не только уменьшение средней величины силы резания, но и уменьшение ее колебаний, что достигается благоприятным смещением во времени циклов работы отдельных режущих лезвий, регулированием длительности контакта режущего лезвия с поверхностью резания, использование методов, обеспечивающих частичное замыкание сил резания в жестком контуре. Существенным вкладом в теорию резания металлов является разработка математических моделей виброустойчивости режущих инструментов. Конструкции режущих инструментов с повышенной виброустойчивостью обладают более высокой стойкостью чем стандартные, а также обеспечивают повышение точности и снижение шероховатости обработанной поверхности изделий. Начальным этапом явилась разработка концевых фрез с разнонаклонными зубьями. Основным средством виброгашения является создание расогласованного характера работы смежных режущих элементов многолезвийных инструментов путем придания им чередующихся различных конструктивных и геометрических параметров. На этом принципе осеивана работа червячных фрез с разнонаклонными стружечными канавками [6]. Смежные режущие гребенки этих фрез выполнены под разным углом наклона к оси, причем наиболее технологичным является вариант, когда в конструкции фрезы чередуются два различных угла наклона.

Создание прогрессивных конструкций режущих инструментов и особенно червячных модульных фрез в первую очередь связано с выравниванием нагрузки на участках режущей кромки. Разработан новый метод графоаналитического анализа схем резания, основанный на имитации кинематических движений в процессе зубофрезерования и получении последовательных

отпечатков образующего профиля в фиксированных положениях. Для определения объема срезаемого слоя режущими элементами червячной фрезы - отдельными кромками, зубьями и гребенками - разработаны новые экспериментальные способы, заключающиеся в осуществлении процесса зубофрезерования по ступенчатому циклу с периодическими остановками для сбора и классификации срезов. На основе этих исследований созданы червячные фрезы повышенной виброустойчивости. На основании этого же принципа разработан ряд конструкций разверток повышенной виброустойчивости.

Гамма разработанных конструкций инструментов с замкнутыми режущими кромками эллипсовидной формы имеют контакт по всему периметру обрабатываемого отверстия, что значительно снижает волнистость поверхности и уменьшает отклонения от геометрической формы [7]. Разработаны конструкции инструментов с конхоидальной и сферической поверхностью для обработки глубоких точных отверстий. Они обеспечивают постоянство геометрических параметров режущей части, в частности, угла в плане, а следовательно, постоянство сечения срезаемого слоя в процессе резания.

Одним из эффективных путей повышения производительности механической обработки труднообрабатываемых материалов является введение дополнительной энергии в зону резания для повышения энергоемкости процесса, т.е. своеобразная накачка энергии. Примером введения тепловой энергии в зону резания является подогрев материала срезаемого слоя. Этот метод обработки эффективен прежде всего для обработки сталей и сплавов высокой прочности и твердости, тугоплавких материалов, а также износостойких, нержавеющей и жаропрочных материалов. Подогрев срезаемого слоя уменьшает сопротивление обрабатываемого материала пластической деформации в зоне стружкообразования и снижает контактные напряжения, действующие на режущем лезвии инструмента. В этих условиях изменяется характер стружкообразования, изменяются условия трения на передней и задней поверхностях инструмента, что ведет к изменению условий наростообразования и вида преобладающего износа. Предварительный нагрев срезаемого слоя, снижая его прочностные характеристики, способствует уменьшению тепловыделения в зоне резания и снижению температур на контактных поверхностях инструмента. Значительные затраты энергии при нагреве металла поверхностного слоя, а также высокая стоимость средств нагрева делает весьма желательным использование технологического тепла операций, проводимых в заготовительных цехах, т.е. горячей обработки давлением, литья, термической обработки и др.

На кафедре разработан новый технологический процесс обработки износостойких наплавленных материалов с использованием технологического тепла дуги при наплавке [8]. Проведены широкие теоретические и экспериментальные исследования обрабатываемости сталей мартенситного класса в условиях нагрева и охлаждения, а также тепловых явлений и износа режущего инструмента. Исследовано влияние технологического тепла наплавки на характер распределения температур в поверхностном слое деталей и стойкость инструмента. Установлено, что оптимальная температура поверхностного слоя обрабатываемых сталей мартенситного класса находится в области температур, соответствующих вторичным фазовым превращениям. Исследована форма обработанной поверхности тел вращения при торцовом фрезеровании, разработаны параметры установки и оптимизированы режимы резания.

Разработан способ плазменно-механической обработки крупных деталей, используемый при ремонте и восстановлении металлургического оборудования [9]. Для подогрева поверхностного слоя, обладающего высокой твердостью, используется плазменная дуга, позволяющая производить его обработку обычным лезвийным инструментом вместо шлифования. Способ существенно повышает производительность обработки в условиях ремонтных служб металлургических и горнорудных предприятий.

Выводы

1. Одним из приоритетных направлений развития теории резания является разработка теоретических положений, связанных с обрабатываемостью новых материалов с особыми физическими свойствами.
2. Перспективным направлением в конструировании режущих инструментов является повышение их виброустойчивости, создание систем управления кинематическими геометрическими параметрами режущей части инструментов с новыми схемами резания.

Перечень ссылок

1. А.с. № 544887, СССР, МКИ G01N3/58. Способ исследования процесса резания / В.П. Беляковский, А.С. Крепак.
2. А.с. № 351063, СССР, МКИ G01b5/30. Способ измерения усадки стружки / В.П. Беляковский, М.П. Пересунько, А.С. Крепак.
3. А.с. № 979917, СССР, МКНГ01L5/16. Способ определения сил на контактных поверхностях режущего инструмента / А.С. Крепак, В.В. Романюк, ЮН. Булко.
4. А.с. № 1301593, СССР, МКИ В23F21/16. Способ определения загрузки кромок зубьев червячной фрезы, *и* А.С. Крепак, С.А. Володин.
5. Патент України, В23С5/04. Різальний інструмент для обробки плоских поверхонь з додатковим осьовим рухом. / О.С. Крепак, С.О. Крепак, Т.О. Клочко.
6. А.с. № 1268325, СССР, МКН4В23F21/16. Червячная фреза. *и* А.С. Крепак, С.А. Володин.
7. Патент України, В23F21/16. Різальний інструмент для обробки отворів. / О.С. Крепак, С.О. Крепак, ВЕ Чайковська.
8. А.с. № 628709, СССР, МКИ С21D1/78, **В21b1/00**. Способ обработки стальных деталей. / *и* И. Иванов, В.П. Беляковский, Е.Ф. Викулов, П.А. Зелепукин.
9. А.с. № 944792, СССР, МКИ В23В1/00. Способ плазменно-механического резания / В.П. Беляковский, Ю.И. Самофалов, В.В. Дианов, П.А. Зелепукин, Э.Р. Фомин, Л.И. Бондаренко.

Беляковский Валерий Павлович. Канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Металлорежущие станки и инструменты" ПГТУ, окончил Одесский политехнический институт в 1954 году. Основные направления научных исследований - совершенствование конструкций режущих инструментов, разработка высокопроизводительных способов механической обработки.

Крепак Александр Сергеевич. Канд. техн. наук, доцент кафедры "Металлорежущие станки и инструменты" ПГТУ, окончил Киевский политехнический институт в 1957 году. Основные направления научных исследований - совершенствование конструкций режущих инструментов повышенной виброустойчивости.