

УДК 621.919.2

DOI: 10.30987/article_5ba8a1865b1200.15607548

С.К. Амбросимов

СНИЖЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ

Проведен анализ моделей для исследования эффекта снижения сил резания при резании механически упрочненных материалов с позиций теории дислокаций и баланса энергии. Представлена перспективная модель исследования процесса резания с опережающим деформированием, позволяющая рассчитать снижение сил резания, которая учитывает историю накопления поврежденности и

изменение показателя напряженного состояния на каждой стадии комбинированного процесса обработки.

Ключевые слова: силы резания, опережающее пластическое деформирование, накопление поврежденности, улучшение обрабатываемости резанием.

S.K. Ambrosimov

CUTTING FORCE DECREASE AT LEADING METAL PLASTIC DEFORMATION

The paper reports the analysis of models for the investigation of a cutting force effect decrease at workable hardened material cutting from the view point of the theory of dislocation and power balance. There is shown a promising model of cutting process study with a leading deformation allowing the computation of cutting force decrease at a leading plastic deformation which is based on the theory of destruction and stepwise takes into account material ductility resource dep-

letion. There is presented a description of the model of cutting with a leading plastic deformation and cutting area elastic-plastic stretching for the process of deforming-cutting drawing. The model takes into account the history of failure accumulation and changes of stress state indices at each stage of combined working.

Key words: cutting forces, leading plastic deformation, failure accumulation, machinability updating by cutting.

В последние годы ведущие фирмы в области разработки комбинированных методов обработки активно изучают эффект

снижения сил резания при опережающем пластическом деформировании (ОПД).

Энергетическая модель

Я.Г. Усачев [1] впервые объяснил эффект снижения усилия резания при обработке «укрепленных» (механически упрочненных) металлов с позиций баланса работ пластической деформации. Он писал: «Прежде чем разрушиться, металл проходит через все стадии упрочнения. Разрушение металла произойдет в тот момент, когда укрепление достигнет наибольшей величины. Чтобы разрушить металл, уже укрепленный до некоторой степени, его нужно меньше деформировать, чем металл вовсе неукрепленный на вели-

чину, соответствующую предварительному укреплению». И далее: «Разность работ будет равна той работе, которая требуется, чтобы довести металл образца до данной степени укрепления».

Однако опыты с растяжением до разрушения упрочненного и отожженного образцов не подтвердили этот последний вывод. Работа, затраченная на разрыв неупрочненных образцов, в четыре раза превысила работу для упрочненных, а при резании это превышение составило от 1,1 до 1,4 раза.

Дислокационная модель

Улучшение обрабатываемости металлов резанием после холодного пластического деформирования А.М. Кузнецов

[2] объясняет с позиций теории дислокаций.

При деформирующем воздействии на металл различаются 3 стадии упрочнения. На первой стадии при приложении напряжения и достижении микроскопического предела упругости источник дислокаций начинает действовать, порождая петли дислокаций, движущиеся под действием напряжения в плоскости скольжения [3].

При встрече петель с поверхностью кристалла на последней возникает ступенька S . Часть петель задерживается в плоскости скольжения, и создается обратное напряжение, затрудняющее действие источника. Линия скольжения может расти под действием постоянно приложенного напряжения. Если напряжение достаточно, источник может послать новые петли, которые беспрепятственно проходят через всю плоскость скольжения.

Так как новые препятствия не возникают из-за отсутствия леса дислокаций (скольжение происходит только по одной системе плоскостей), то процесс может повторяться при одном и том же уровне напряжения. Вот почему на первой стадии в условиях сдвига упрочнение мало. Высота ступеньки обычно мала - 50...100 А, при длине линии скольжения 1 мм.

Переход к стадии II (по Хиршу [4]) происходит в тот момент, когда расстояние между скоплением диполей становится очень малым и внутренние напряжения, вызываемые нагромождениями дислокаций, складываясь с приложенным напряжением, становятся достаточными для возникновения дислокаций во вторичной системе. На второй стадии линии скольжения короче и расположены менее регулярно, чем на первой. Изучение дислокационной структуры меди показало, что здесь возникают сплетения диполей с дислокацией леса, в результате чего образуется нерегулярная сетка дислокаций. Средняя плотность дислокаций к концу стадии достигает 10^{16} см⁻². Плотность дислокаций в отожженном материале - в среднем 10^6 - 10^8 см⁻². Началу второй стадии соответствует катастрофический лавинообразный процесс генерирования дислокаций источниками Франка - Рида во вторичной системе плоскостей скольжения. В результате об-

разуется большое количество сидячих дислокаций, которые представляют собой эффективные барьеры для прохождения новых дислокаций, т.е. возникают их нагромождения. Число дислокаций увеличивается пропорционально деформации.

Третья стадия характеризуется развитием полос скольжения, длина которых зависит от величины предшествующей деформации. На определенном этапе наблюдается развитие поперечного скольжения, в этом случае полосы скольжения несколько расширяются. В результате скопления дислокаций перед препятствием сдвиг в исходной плоскости скольжения может затормозиться. Посредством поперечного скольжения винтовые дислокации могут при некоторых условиях переходить на соседнюю параллельную плоскость, и она образует там новый источник, который под действием приложенного напряжения дополнительно генерирует некоторое количество дислокаций и обеспечивает за счет этого пластический сдвиг. На этой стадии коэффициент упрочнения уменьшается по сравнению с наблюдаемым на второй стадии, вследствие чего понижается интенсивность роста сопротивления течению. На третьей стадии дислокационная структура кристалла зависит не только от величины напряжения или деформации, но и от напряженного состояния.

Зарождение или присутствие дислокаций в кристалле не приводит непосредственно к нарушению сплошности кристаллической решетки, т.е. к образованию свободной поверхности (субмикротрещины). Однако атомные слои в месте расположения дислокаций упруго искажены таким образом, что возникает локальная концентрация напряжений.

Дислокация служит центром упругой деформации. По мере удаления от этого центра концентрация напряжений убывает по закону L/r . Дислокации, у которых вектор Бюргерса расположен в плоскости скольжения, довольно подвижны и под действием приложенного напряжения перемещаются в плоскости скольжения, благодаря чему происходит пластический сдвиг. Дислокации способны размножать-

ся в процессе пластической деформации, при этом число их в металле увеличивается на много порядков. В недеформированном металле плотность дислокаций составляет 10^6 - 10^8 см⁻², а в упрочненном пластическим деформированием достигает 10^{11} - 10^{12} см⁻².

В зоне расположения дислокации увеличивается свободная энергия кристаллической решетки. Поэтому сама по себе дислокация является термодинамически неустойчивым образованием, но из-за уравновешенности сил, действующих на дислокацию, она будет находиться в некотором метастабильном состоянии. Для выведения ее из этого состояния надо сообщить ей дополнительную энергию извне (например термическую). Энергия кристалла уменьшится, при этом дислокация либо переместится до нового метастабильного состояния, либо покинет кристалл.

Сближение дислокаций разного знака приводит к их аннигиляции, а одного знака - к повышению концентрации напряжений, так как поля одного знака отталкиваются. Энергия кристалла в общем случае увеличивается за счет увеличения свободной энергии каждой дислокации и за счет взаимодействия полей дислокаций и дислокаций с поверхностями раздела кристаллов и инородных фаз.

Дислокации, движущиеся в кристалле, порождают дефекты, которые возникают при взаимных пересечениях дислокаций и огибании ими мелких инородных включений. Эти дефекты - дислоцированные атомы и вакансии - являются причиной образования субмикротрещин и в конечном счете приводят к разрушению материала.

Существует три типа механизмов образования микротрещин:

1. Дислокации достигают критической величины в одной плоскости скольжения.
2. Нагромождения дислокаций происходят за счет их взаимодействия в пересекающихся плоскостях скольжения.
3. Трещины образуются в результате взаимодействия дефектов кристаллической решетки - вакансий и дислокаций.

Стро и Гриффитс предположили, что трещина должна возникать, если ее образование приведет к уменьшению энергии искажения решетки, а также разрушение должно произойти, когда упругая энергия по величине превысит поверхностную энергию, необходимую для образования трещины.

Питч предположил, что хрупкое разрушение наступает в момент, когда в результате нагромождения дислокаций превышает теоретическая прочность.

Гилман в монокристалле цинка сделал искусственное препятствие в виде латунной скобки, которая служила надежным барьером для продвижения дислокаций по плоскостям сдвига, так как предел текучести у латуни выше, чем у цинка. В результате возникла ослабленная прослойка, которая раскрывалась в трещину под действием растягивающей компоненты, примерно перпендикулярной к плоскости скольжения.

Пока не доказанной, но заслуживающей внимания является модель Прайса, при которой зарождение трещины происходит из-за локального совмещения дислокаций, перемещающихся в параллельных плоскостях скольжения, что может создать области, совмещающие большие внутренние напряжения вблизи источника.

Несмотря на то что большинство моделей, приводящих к различным механизмам зарождения хрупких трещин, пока еще не подтверждены экспериментально, несомненно, что именно они являются основным фактором слияния трещин, приводящим к хрупкому разрушению. Возможность смыкания и самозалечивания микротрещин определяет весьма низкий КПД процесса разрушения.

При резании металлов в основном энергия идет на деформирование прилегающей зоны, и лишь ничтожная часть - на увеличение поверхностной энергии системы, т.е. на образование магистральной трещины, приводящей к отделению слоя материала. Полная энергия разрушения превышает поверхностную энергию более чем на 3 порядка. По мере увеличения сте-

пени деформации трещины теряют устойчивость, и последующее срезание такого слоя приводит к тому, что отдельные микротрещины под действием режущего зуба сливаются в макротрещину.

При предварительном поверхностном пластическом деформировании поперечные микротрещины постепенно переходят в макротрещины, а при повторном воздействии - в продольные, образуя тем самым чешуйчатое отслоение.

Максимальные значения плотности субмикротрещин должны быть, очевидно,

в зоне с максимальным значением микротвердости, так как именно здесь максимальная плотность скопления дислокаций. Необходимо отметить, что ни направление расположения микротрещин, ни характер изменения их плотности по глубине применительно к поверхностному пластическому деформированию подробно не исследованы, хотя это важно для определения снижения энергозатрат на резание при опережающем деформировании.

Модель, учитывающая исчерпание ресурса пластичности при различных характерах накопления поврежденности

Скопление микротрещин при любом виде пластического деформирования, в том числе и при резании, зависит от накопления поврежденности [5]. Накопление поврежденности связано как со степенью деформации, так и с условиями нагружения, которые определяются многими факторами, в частности показателем напряженного состояния и историей нагружения. На динамику накопления микротрещин влияют знак и величина гидростатического давления, с ростом которого растет интенсивность залечивания микротрещин и снижается КПД процесса разрушения.

В последние годы большое внимание уделяется комбинированной обработке резанием с опережающим деформированием, такой как размерная совмещенная обработка обкатыванием и деформирующе-режущее протягивание [6-8]. Однако до сих пор не разработан надежный и достоверный математический аппарат для расчета снижения силы резания при ОПД. Причиной этого является то, что при комплексном деформирующем воздействии и резании действуют разные механизмы накопления поврежденности с разными показателями напряженного состояния, которые необходимо учитывать. Кроме того, при разработке модели процесса резания с ОПД необходимо накопленную поврежденность при опережающем деформировании привести к поврежденности, накопленной при резании [9], через диаграмму

пластичности обрабатываемого материала, которая определяет степень деформации сдвига, соответствующую моменту разрушения материала, в зависимости от показателя напряженного состояния. Например, при деформирующе-режущем протягивании с ОПД и упругопластическом нагружении (УПН) [10] вначале происходит накопление поврежденности, соответствующей процессу ОПД с отрицательным показателем напряженного состояния - σ/T , так как перед режущее деформирующим зубом по ходу протяжки расположен деформирующий элемент. Далее в зону обработки входит деформирующе-режущий элемент, при этом уже деформированный слой начинает растягиваться в зоне резания. Величина степени сдвиговой деформации, соответствующей накопленной ранее при ОПД поврежденности, в переводе на положительный показатель напряженного состояния, характерный для одноосного растяжения, значительно снижается. Растянутый упругопластически слой металла, расположенный между режущими зубьями, приобретает дополнительную поврежденность при показателе напряженного состояния, характерном для процесса одноосного растяжения. Режущий зуб, расположенный между деформирующими, срезает растянутый поверхностный слой при уже новом σ/T , характерном для срезания растянутого слоя. Известный показатель напряженного состояния процесса резания корректирует-

ся с использованием принципа суперпозиции, т.е. наложением дополнительного напряжения растяжения по одной из осей. Итоговая (скорректированная) степень деформации сдвига, соответствующая резанию с ОПД и УПН, использована в модели баланса работ, предложенной Я.Г. Усачевым.

Теоретические исследования с позиций баланса работ пластической деформации и теории дислокаций недостаточно полно выявляют и объясняют причины

улучшения обрабатываемости резанием материалов, предварительно обработанных поверхностным пластическим деформированием.

Перспективные модели расчета обрабатываемости резанием с ОПД и УПН должны учитывать историю накопления поврежденности и изменение показателя напряженного состояния, а также соответствующее изменение степени деформации сдвига на каждом этапе комбинированного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русские ученые - основоположники науки о резании металлов / под ред. К.П. Панченко. - М.: Машгиз, 1952. - 480 с.
2. Кузнецов, А.М. Технологические основы создания методов обработки в машиностроении: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Кузнецов. - М., 1975. - 298с.
3. Смирнов, В.С. Теория обработки металлов давлением / В.С. Смирнов. - М.: Metallurgy, 1973. - 496 с.
4. Иванова, В.С. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко, В.Н. Геминюв. - М.: Наука, 1965. - 180 с.
5. Богатов, А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.Н. Мижирицкий, С.В. Смирнов. - М.: Metallurgy, 1984. - 144 с.
6. Амбросимов, С.К. Новые прогрессивные методы деформирующе-режущего протягивания и инструменты / С.К. Амбросимов // Вестник Липецкого государственного технического университета. - 2016. - №1 (27). - С. 54-63.
7. Амбросимов, С.К. Экспериментальные исследования деформирующе-режущего протягивания с опережающим пластическим деформированием и упругопластическим нагружением, с упругопластическим нагружением и косоугольным резанием / С.К. Амбросимов, А.В. Киричек // Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки. - М.: Спектр, 2011. - 327 с.
8. Амбросимов, С.К. Определение конструкторско-технологических параметров протяжек с упругопластическим нагружением зоны резания / С.К. Амбросимов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2011. - № 4. - С. 85-89.
9. Киричек, А.В. Интенсификация процессов комбинированного протягивания круглых отверстий / А.В. Киричек, С.К. Амбросимов. - М.: Машиностроение-1, 2009. - 148 с.
10. Амбросимов, С.К. Упругопластическое растяжение зоны резания - инновационное направление деформирующе-режущего протягивания / С.К. Амбросимов // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2018. - № 3. - С. 38-42.

10. Ambrosimov, S.K. Cutting area elastic-plastic stretching – innovation direction of deformation-cutting

drawing / S.K. Ambrosimov // *Repair, Restoration, Improvement.* – 2018. – No. 3. – pp. 38-42.

Статья поступила в редакцию 16.04.18.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного
технического университета*

Киричек А.В.

Статья принята к публикации 10.05.18.

Сведения об авторах:

Амбросимов Сергей Константинович, д.т.н., профессор Липецкого государственного технического университета, e-mail: ambsk@mail.ru.

Ambrosimov Sergey Konstantinovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of Lipetsk State Technical University, e-mail: ambsk@mail.ru.