УДК 621.85.05-034

[1] **С. К. Амбросимов,** д-р техн. наук, проф., [2] **А. В. Морозова,** канд. техн. наук, доцент
[1]Липецкий государственный технический университет, Россия
[2]Брянский государственный технический университет, Россия
Тел.: +7 (919) 2027007; *E-mail:* niotiostu@gmail.com

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ УПРОЧНЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

В статье проанализирован ряд теоретических подходов, объясняющих явления снижения сил резания механически упрочненных материалов с позиции дислокационной теории и баланса энергии пластической деформации. Представлена Феноменологическая теория исследования процесса резания с опережающим деформированием, позволяющая оценить величину снижения сил резания, а также модель, которая учитывает поэтапное накопление поврежденности, с учетом изменения показателя напряженного состояния на каждом этапе пластической деформации в процессе обработки, что составляет новизну работы.

Ключевые слова: *теория разрушения, сила резания, механическое упрочнение, упрочнение металлов*

S. K. Ambrosimov, A. V. Morozova

THE PHENOMENOLOGICAL THEORY OF DESTRUCTION IN THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF REDUCING THE FORCES OF CUTTING MECHANICALLY STRENGTHENED METALS

The article analyses a number of theories for explaining the phenomenon of reducing cutting forces of mechanically hardened materials from the perspective of dislocation theory and the energy balance of plastic deformation. The Phenomenological theory of research of the cutting process with advanced deformation is presented, allowing to estimate the magnitude of reduction of cutting forces, as well as a model that takes into account the gradual accumulation of damage, taking into account the change in the stress state indicator at each stage of plastic deformation during processing, which is new.

Keywords*: destruction theory, cutting force, mechanical hardening, metal hardening.*

1. Введение. Энергетическая теория

Современные направления развития теории резания [1, 2] затрагивают как проблемы создания новых видов станочного оборудования [3] и металлорежущего инструмента [4, 5], оценки качества резки металла [6], так и задачи оптимального применения смазочно-охлаждающих жидкостей [7, 8], исследования остаточных поверхностных напряжений при резке металла [9], а также моделирования процесса резания [10, 11], в том числе и с применением современных математических методов [12, 13].

Перспективным направлением в теории резания является исследование явления снижения силы резания при обработке "укрепленных", т. е. механически упрочненных металлов. Я.Г. Усачев впервые объяснил это явление с позиций баланса работ пластической деформации в работе [14]. Он утверждал, что: «Прежде чем разрушится 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 величину, соответствующую предварительному укреплению». И далее: «… разность работ будет равна той работе, которая требуется, чтобы довести металл образца до данной степени укрепления».

© Амбросимов С.К., Морозова А.В.; 2019

Проведенные им же эксперименты с растяжением до разрушения, механически упрочненного и отожженного образцов, не подтвердили, последнего предположения. Работа, затраченная на разрыв неупрочненных образцов, до четырех раз превышала работу, механически упрочненных, а при обработке резанием это превышение составило до 1,4 раз.

2. Снижение сил резания при опережающем деформировании с позиции теории дислокации

Улучшение обрабатываемости металлов резанием после деформирующего протягивания А.М. Кузнецов [15] объясняет с позиций теории дислокаций. Различаются три стадии упрочнения металлов. При приложении напряжения и достижении микроскопического предела упругости, источник дислокаций на первой стадии начинает генерировать петли дислокаций, движущиеся под действием напряжения в плоскости скольжения [16].

Петли выходят на поверхность кристалла, с образованием ступенек S на последней. При этом, часть петель задерживается в плоскости скольжения, что создает обратное напряжение, препятствуя действию источника дислокаций. Линия скольжения растет под действием постоянно приложенного напряжения. При достаточной величине напряжения источник может генерировать новые петли, которые беспрепятственно проходят через всю плоскость скольжения.

Новые препятствия в плоскости скольжения на первой стадии не возникают из-за отсутствия леса дислокаций, (скольжение происходит только в одной системе плоскостей). Этот процесс повторяется при одном и том же уровне напряжения. Поэтому в условиях сдвига на первой стадии упрочнение мало. Высота ступеньки не превышает 50 – 100 А, при длине линии скольжения 1мм.

По-Хиршу, переход от стадии I к стадии II происходит тогда, когда внутренние напряжения, вызываемые лесом дислокаций, складываясь с действующим напряжением становятся достаточными для возникновения дислокаций во вторичной системе, а расстояние между скоплением диполей становится очень малым. Из-за скопления дислокаций на второй стадии линии скольжения становятся короче и расположены менее регулярно, чем на первой. На основании исследований дислокационной структуры меди было установлено, что на этой стадии возникают сплетения диполей с дислокацией леса, в результате чего образуется нерегулярная сетка дислокаций. Так к концу второй стадии средняя плотность дислокаций достигает 10^{16} см$^{-2}$. В отожженном материале плотность дислокаций в среднем составляет 10^{6}-10^{8} см$^{-2}$. Лавинообразный процесс генерирования дислокаций источниками Франка Рида во вторичной системе плоскостей скольжения соответствует началу второй стадии. К этому моменту образуется большое количество неподвижных дислокаций, которые препятствуют прохождению новых дислокаций, таким образом, растут их нагромождения. Число дислокаций увеличивается пропорционально деформации.

Рост напряжения на третьей стадии способствует развитию полос скольжения, длина которых зависит от величины предшествующей деформации. Перемещение дислокаций на определенном этапе уже невозможно в направлении напряжения, в результате наблюдается развитие поперечного скольжения. При этом полосы скольжения расширяются. Сдвиг в плоскости скольжения может затормозиться за счет скопления дислокаций перед препятствием. Винтовые дислокации при некоторых условиях могут переходить на соседнюю параллельную плоскость за счет поперечного скольжения. Там дислокация образует новый источник, который под действием приложенного на-

пряжения дополнительно порождает некоторое количество дислокаций и обеспечивает пластический сдвиг в новой плоскости. За счет этого рост механического упрочнения снижается по сравнению с наблюдаемым на второй стадии, за счет этого понижается интенсивность роста сопротивления течения. На третьей стадии на плотность дислокаций и дислокационную структуру металла влияет не только величина напряжения или деформации, но и напряженное состояние.

Рост и наличие дислокаций не влияет на нарушение сплошности кристаллической решетки, т.е. не приводит к образованию субмикротрещин. При этом зоны в местах скопления дислокаций испытывают значительные упругие искажения, за счет отсутствия большого количества атомных слоев, таким образом, возникают локальные концентрации напряжений.

Дислокация является центром упругой деформации. Концентрация напряжений убывает по закону L/r по мере удаления центра дислокации. Дислокации, у которых вектор Бюргерса расположен в плоскости скольжения, довольно подвижны и под действием приложенного напряжения перемещается в плоскости скольжения, благодаря чему происходит пластический сдвиг. В процессе пластической деформации дислокации размножаются различным образом, при этом число их в металле увеличивается на несколько порядков. В отожженном недеформированном металле плотность дислокаций составляет 10^6-10^8 см$^{-2}$, а в механически упрочненном их плотность достигает 10^{11}-10^{12} см$^{-2}$.

В местах локализации дислокаций свободная энергия кристаллической решетки увеличивается. Несмотря на то, что дислокация является термодинамически неустойчивым образованием, она находиться в метастабильном состоянии из-за того, что силы, действующие на нее, уравновешены. Для выведения кристалла из метастабильного состояния надо ввести дополнительную энергию, например, термическую. Дислокация при этом либо покинет кристалл, либо переместится до нового метастабильного состояния, а энергия кристалла уменьшится.

Увеличение энергии кристалла происходит за счет увеличения свободной энергии каждой из дислокаций, их количества и за счет взаимодействия полей дислокаций, а также дислокаций с поверхностями раздела кристалла.

Дислокации, являясь дефектами, при движении в кристалле, порождают новые дефекты, возникающие при взаимных пересечениях дислокаций и при огибании ими мелких инородных включений. Эти дефекты суммируются, приводят к образованию больших скоплений, центры этих образований являются причиной появления субмикротрещин и, в конечном счете, приводит к разрушению материала.

Существует три типа механизмов образования микротрещин:

1) в одной плоскости скольжения дислокации достигают критической величины;

2) при движении в пересекающихся плоскостях скольжения дислокации взаимодействуют, порождая нагромождения, которые препятствуют перемещению по плоскостям скольжения;

3) в результате взаимодействия дефектов кристаллической решетки вакансий и дислокаций.

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

По теории Питча хрупкое разрушение наступает при условии, когда в результате нагромождения дислокаций превышается теоретическая прочность.

По-Гилману искусственное препятствие в монокристалле цинка в виде латунной скобки, послужило надежным барьером для продвижения дислокаций по плоскостям сдвига (предел текучести у латуни выше, чем у цинка). В результате этого в плоскости скольжения у искусственного препятствия возникли нагромождения дислокаций, они привели к ослабленной прослойке, которая раскрывалась в трещину под действием растягивающей компоненты, перпендикулярной к плоскости скольжения.

Заслуживающей внимания, но пока недоказанной, является модель Прайса, при которой зарождение трещины возникает из-за локального совмещения дислокаций, которые перемещаются в параллельных плоскостях скольжения, что приводит к образованию областей, локализующих большие внутренние напряжения вблизи источника.

Несомненно, что именно эти механизмы являются основным фактором сливающихся трещин, приводящим к хрупкому разрушению, несмотря на то, что большинство моделей, приводящих к хрупкому разрушению, пока еще не подтверждены экспериментально. Низкий КПД процесса разрушения при различных схемах механического разрушения определяет представленный механизм смыкания и самозалечивания микротрещин в процессе деформации.

При резании металлов основная энергия затрачивается на деформирование в процессе обработки прилегающей к передней поверхности зуба зоны, и лишь ничтожная часть на увеличение поверхностной энергии системы, т.е. на образование магистральной трещины, приводящей к стружкообразованию. Общая энергия разрушения при резании превышает поверхностную энергию более чем на 3…4 порядка. Трещины становятся неустойчивыми при увеличении степени предварительной деформации и последующее срезание такого слоя приводит к тому, что отдельные субмикротрещины под деформирующим действием режущего клина сливаются в макротрещину.

При опережающем поверхностном пластическом деформировании, поперечные микротрещины постепенно переходят в макротрещины, а при повторном воздействии - в продольные, что приводит к чешуйчатому отслоению.

Зоны с максимальной концентрацией субмикротрещин должна локализоваться в местах с максимальным значением микротвердости, т.е. в зонах с максимальной плотностью скопления дислокаций. Однако ни характер изменения плотности микротрещин по глубине, ни направление их расположения применительно к поверхностному пластическому деформированию не исследован, хотя это важно для исследования процессов резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД).

3. Феноменологическая модель, учитывающая поэтапное исчерпание ресурса пластичности при двустадийной деформации

Скопление субмикротрещин, связанное с накоплением поврежденности, при любом виде пластического деформирования, а также резании зависит от характера нагружения [17]. Накопление поврежденности зависит как от степени деформации, так и от условий нагружения, которые определяются рядом факторов: показателем напряженного состояния и историей нагружения. На динамику накопления поврежденности влияет величина и знак гидростатического давления, с ростом давления растет скорость залечивания микротрещин, при этом КПД процесса разрушения уменьшается.

В последнее время большое внимание уделяется комбинированным методам обработки, в том числе резанием с предварительным поверхностным деформированием таким, как размерная совмещенная обработка и деформирующе–режущее протягивание [18, 19]. В связи с этим возникла настоятельная необходимость разработки надежной и достоверной математической модели резания с ОПД. Основной проблемой создания

такой модели является то, что при комбинированном деформирующем воздействии и резании работают различные механизмы накопления поврежденности с разными схемами нагружения и, как следствие, с различными показателями напряженного состояния, которые надо учитывать.

Для этого, в модели процесса резания с ОПД (рис. 1), необходимо накопленную поврежденность при предварительном поверхностном деформировании (кривая 1) привести к соответствующей поврежденности процесса резания (кривая 2) [17], через диаграмму пластичности обрабатываемого материала (кривая 3), которая определяет степень деформации сдвига соответствующей моменту разрушения материала в зависимости от показателя напряженного состояния.

При ОПД процесс накопления поврежденности проходит по кривой 1 с показателем напряженного состояния *σ/T* меньшим по величине показателя напряженного состояния процесса резания до некоторого значения соответствующего точке *A*. Затем начинается процесс резания и накопление поврежденности продолжается по кривой 2 с большим значением показателя *σ/T,* но с уже накопленной поврежденностью ω_1 и деформацией $\sqrt{3}\varepsilon_2(a)$, соответствующей началу процесса резания.

Таким образом, в модели баланса работ учитывается не всю работу предварительной пластической деформации и соответствующая ей сдвиговая деформация $\sqrt{3}\varepsilon_1(a)$, а лишь часть с меньшим значением сдвиговой деформации $\sqrt{3}\varepsilon_2(a)$.

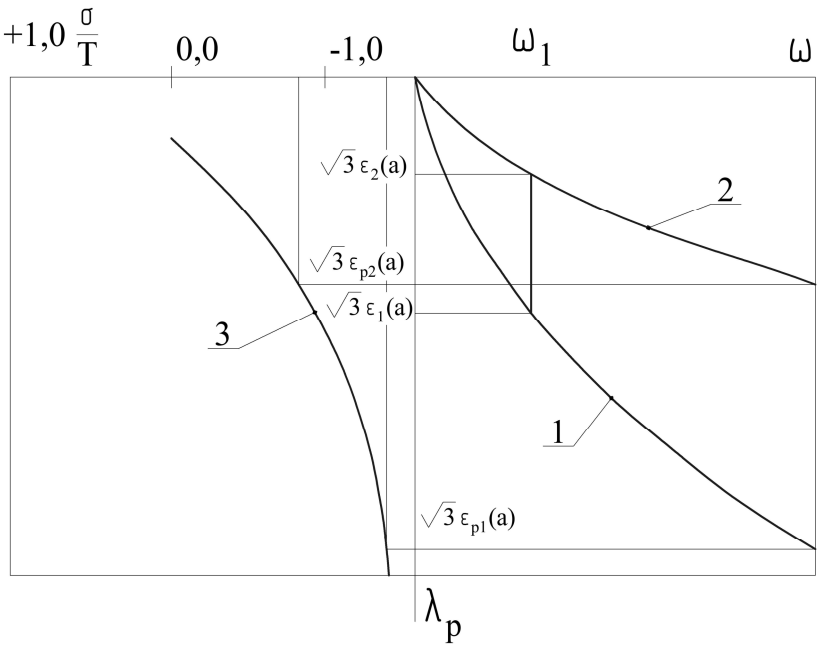

Рисунок 1. Схема накопления поврежденности в 2 этапа при резании с ОПД

Например, при деформирующе–режущем протягиванием с ОПД и упругопластическим растяжением (УПН) [19, 20] накопление поврежденности в начале соответствующей процессу ОПД с отрицательным показателем напряженного состояния *–σ/T*, т.к. перед режуще-деформирующим зубом по ходу протяжки расположен деформирующий элемент. Затем в обрабатываемое отверстие входит деформирующе–режущий элемент, у которого деформирующие зубья расположены между режущими, в местах стружкоразделительных канавок. Деформированные ранее

слои металла начинают одноосно растягиваться деформирующими зубьями в зоне размещения режущих зубьев. Степень сдвиговой деформации, соответствующей накопленной ранее при ОПД поврежденности, в переводе на положительный показатель напряженного состояния, характерного для одноосного растяжения, значительно снижается. Упруго-пластически растянутые слои металла, расположенные между режущими зубьями, приобретают дополнительную поврежденность, за счет одноосного растяжения при показателе напряженного состояния, характерного для процесса растяжения. Режущие зубья, расположенные между деформирующими, срезают растянутые поверхностные слои, при измененном σ/T. Показатель напряженного состояния процесса резания, установленный по коэффициенту усадки стружки и изменения ее микротвердости, корректируется с использованием принципа суперпозиции, т.е. наложением дополнительного напряжения растяжения по одной из осей. Таким образом, предложенная Я. Г. Усачевым модель баланса работ пластической деформации изменена с учетом накопления поврежденности, соответствующей постадийному изменению показателя напряженного состояния и соответствующей этому состоянию диаграмме пластичности; измененная модель использована для процесса резания с ОПД и УПН.

4. Заключение

Теоретические исследования с позиции баланса работ пластической деформации и теории дислокаций недостаточно полно выявляют причины улучшения обрабатываемости материалов резанием и не позволяют оценить величину снижения силы резания материалов, предварительно обработанных поверхностным пластическим деформированием.

Перспективные модели расчета обрабатываемости резанием с ОПД и УПН должны учитывать изменение показателя напряженного состояния и историю накопления поврежденности с учетом изменения показателя напряженного состояния и соответствующего изменения степени деформации сдвига на каждом этапе комбинированного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Binder, M. Abrasive wear behavior under metal cutting conditions / Binder M., Klocke F, Doebbeler B., 2017– Wear, Elsevier 2017.

2. Razak, N. H. 2017 Cutting force and chip formation in end milling operation when machining nickel-based superalloy / Razak N. H., Rahman M. M. // Hastelloy C-2000 Journal of Mechanical Engineering Education (jmes.ump.edu.my)

3. Krestyaninov, P. N. 2017 Selection of metal-cutting machines in operational design by means of PLM systems Russian Engineering Research (Springer) / Krestyaninov P. N., Khusainov R. M., Yurasov S. Y.

4. Binder, M. 2017 An advanced numerical approach on tool wear simulation for tool and process design in metal cutting Simulation modelling practice and theory (Elsevier) / Binder M., Klocke F., Doebbeler B.

5. Johansson, D. 2017 Assessment of Commonly used Tool Life Models in Metal Cutting Procedia Manufacturing (Elsevier) / Johansson D., Hagglund S., Bushlya V., Stahl J. E.

6. Konigs, M. 2018 Process-parallel virtual quality evaluation for metal cutting in series production Procedia Manufacturing (Elsevier) / Konigs M., Brecher C.

7. Gajrani, K. K. 2017 Past and current status of eco-friendly vegetable oil based metal cutting fluids Materials Today: Proceedings (Elsevier) / Gajrani K. K., Sankar M. R.

8. Mang, T. 2017 Metalworking fluids Lubricants and lubrication (Wiley Online Library) / Mang T., Freiler C., Horner D.

9. Buchkremer S., 2017 Compilation of a thermodynamics based process signature for the formation of residual surface stresses in metal cutting Wear (Elsevier) / Buchkremer S., Klocke F.

10. Malakizadi, A. 2017 Influence of friction models on FE simulation results of orthogonal cutting process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Springer) / Malakizadi A., Hosseinkhani K., Mariano E.

11. Rodriguez, J. M. 2017 Simulation of metal cutting using the particle finite-element method and a physically based plasticity model Computational Particle Mechanics (Springer) / Rodriguez J. M., Jonsen P., Svoboda A.

12. Gok, K. 2017 Three-dimensional finite element modeling of effect on the cutting forces of rake angle and approach angle in milling Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America (journals.sagepub.com) / Gok K., Sari H., Gok A., Neseli S.

13. Kaselouris, E. 2017 A study of explicit numerical simulations in orthogonal metal cutting Solid State Phenomena (Trans Tech Publ.) / Kaselouris E., Papadoulis T., Variantza E.

14. Панченко, К. П. Российские ученые - основатели металлорежущей науки / К. П. Панченко. – Москва: МАШГИЗ, 1965. – 480 с.

15. Кузнецов, А. М. Технология основ создания методов лечения в технике / А. М. Кузнецов. – Москва: МАМИ, 1975. – 298 с.

16. Иванова, В. С. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / В. С. Иванова, Л. К. Гордиенко, В. Н. Геменов. – Москва: Наука, 1965. – 180 с.

17. Богатов, А. А. Пластическое время жизни металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. Н. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.

18. Амбросимов, С. К. Новые прогрессивные методы и инструменты деформационно-режущей протяжки / С. К. Амбросимов // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2016. – № 1 (27). – С. 54-63.

19. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки. Коллективная монография / С. К. Амбросимов, А. Н. Афонин, А. Р. Ингеманссон, А. Н. Исаев, А. В. Киричек, Д. В. Крайнев, А. Р. Лебедев, В.Ф. Макаров, А. В. Морозова, П. А. Норченко, Ю. Н. Полянчиков, Д. Л. Соловьев; под ред. А. В. Киричека - Москва: Издательский дом «Спектр», 2011. – 328 с. – ISBN 978-5-904270-84-1.

20. Амбросимов, С. К. Упругопластическое растяжение зоны резания - инновационное направление деформирующе-режущего протягивания / С. К. Амбросимов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 3. – С. 38 - 42.

Поступила в редколлегию 13.02. 2019 г.