

**В. К. СТАРКОВ**, д-р техн. наук, Москва, Россия

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДОСТИЖЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ**

На основі дислокаційних уявлень фізики пластичної деформації й руйнування, зроблений теоретичний прогноз про можливість різання металів зі швидкістю, близької до швидкості звуку.

На основе дислокационных представлений физики пластической деформации и разрушения, сделан теоретический прогноз о возможности резания металлов со скоростью, близкой к скорости звука.

On basis of dislocation conceptions of physics of plastic deformation and destruction, was made theoretical prognosis on possibility of cutting of metals with speed, similar to speed of a sound.

История становления и развития теории резания – это история непрерывного поиска путей повышения его производительности и, прежде всего, за счет увеличения скорости обработки.

Експериментально установленная и широко используемая на практике связь между скоростью резания и износом (стойкостью) режущего инструмента послужила базисом для придания скорости резания релевантного статуса эффективности технологических систем формоизменения удалением стружки.

Достигнутая скорость резания в настоящее время стала критерием обрабатываемости конструкционных материалов, режущей способности инструментальных материалов и инструмента, технического уровня станочного оборудования и технологического процесса механической обработки в целом.

Повышение скорости резания, как и в других технических отраслях, стало мотивирующим фактором дальнейшего совершенствования всех элементов системы резания.

*Анализ экспериментальных данных.* К настоящему времени для уровня скоростей, достижимых современными инструментальными материалами, сложилась общепринятая точка зрения влияния скорости резания на основные его функциональные параметры – силу и температуру. Эти параметры характеризуют сопротивление

обрабатываемого материала резанию, по которым можно судить о интенсивности его деформации и контактных явлений.

Неоднократно экспериментально подтвержденная точка зрения сводится к тому, что с увеличением скорости резания сила уменьшается, а измеренная контактная температура – возрастает. Причем общим для этих закономерностей является стабилизация значений силы и температуры при достижении конкретных величин скорости резания. Конкретность величин  $V$  при этом обусловлена обрабатываемым материалом, видом обработки, его технологическими параметрами и т.д.

В качестве наглядной иллюстрации изложенного можно рассмотреть результаты Е.Д. Саломоновича измерений температуры при продольном тчении образцов углеродистой и хромистой стали, чугуна и цветных металлов: цинка, латуни и алюминия. Средняя температура в контакте резца со стружкой определялась методом естественной термопары (рис. 1).

Предельная скорость резания в экспериментах достигала 2000 м/мин. Из рис. 1 следует, что с увеличением скорости резания температура также растет и ее величина стабилизируется, достигая предела, равного температуре плавления обрабатываемого металла. Отмеченный эффект связан с измеренной температурой металла в состоянии, близком к его расплавлению.

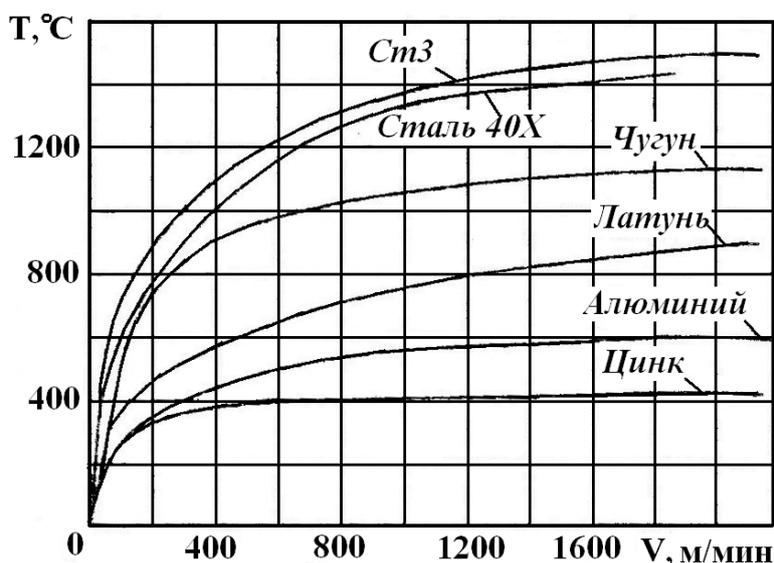


Рисунок 1 – Влияние скорости резания на температуру при тчении различных материалов

Зеркально отраженная закономерность наблюдалась многими исследователями при изучении влияния скорости на силу резания (см.,

например, работу С.С. Силина, где совмещено изменение температуры и силы от скорости обработки [1].

Интрига в ситуации с возможностью увеличения скорости резания до предельных, пока неясно каких значений была заложена работой немецкого инженера К. Саломона, опубликованной более 70 лет назад. Исследуя отрезку алюминиевых листов дисковой фрезой большого диаметра при различных скоростях резания – до 16500 м/мин, он пришел к выводу, что с увеличением скорости обработки температура резко возрастает, а затем столь же резко падает. Таким образом, существует, по его мнению, две критические скорости резания, ограничивающие диапазон крайне неблагоприятных условий резания по причине высокой температуры нагрева [2].

В исследованиях со скоростями резания до 72000 м/мин, выполненных американскими учеными в более позднее время – в 60-е годы прошлого века, не был зафиксирован какой-либо заметный износ инструмента, а стружкообразование происходило вследствие крошения обрабатываемого металла. При высокоскоростной обработке с определенной величиной подачи было отмечено незначительное повышение температуры. Пластическая деформация при сверхскоростном резании является процессом адиабатическим, а наблюдаемое уменьшение сил и температур становится следствием изменения характера деформации [2].

В описанных выше экспериментах достигнутая скорость резания не превысила  $1/5$  скорости звука, с которой в металлофизике сопоставляются скорости протекания физико-химических явлений атомарного масштаба, включая зарождение и движение дефектов кристаллической решетки.

С помощью энергии взрыва бризантных взрывчатых веществ В.В. Швецу, И.Г. Гриченко и Б.П. Рыковскому удалось достичь более высокого предела: расчетная скорость резания была увеличена до 5800 м/с. Неподвижный резец из быстрорежущей стали Р18 должен был прорезать паз в образце, движущимся в вакуумной камере под действием взрывной волны. В условиях сверхскоростного резания изучалось поведение образцов из алюминиевых сплавов Д16А, АМГ-6 и титанового сплава ВТЗ-1.

В качестве процесса резания использованная схема может рассматриваться лишь условно, т.к. при ударе образца о резец он терял свою скорость и, дальнейшее его поведение становилась непредсказуемым. Тем не менее, поведение обрабатываемого материала в условиях, имитирующих его обработку со снятием стружки, на скоростях, ранее

недоступных для исследований, представляет определенный интерес для последующих прогнозов.

Основные итоги проведенных экспериментов можно свести к следующему. При скоростях 115 и 1080 м/с на образцах из алюминиевых сплавов Д16А и АМГ-6 удалось прорезать пазы с минимальными следами пластической деформации. После прорезания паза на скорости 1080 м/с вершина резца оказалась разрушенной.

Этими результатами было продемонстрирована принципиальная возможность резать металл в использованной экспериментальной установке с помощью энергии взрыва. Опыты с более высокими скоростями показали неожиданные результаты: при обработке со скоростями 2260 и 5800 м/с образцы из алюминиевого сплава Д16А и титанового сплава ВТЗ-1 в момент удара резца разрушились.

*Теоретические оценки предельной скорости резания.* В теории резания, которая базируется в основном на описании обработки материалов лезвийным инструментом, нет однозначного представления о влиянии сверхвысоких скоростей резания на выходные параметры процесса. Противоречивость прогнозных оценок объясняется неопределенностью возможной реакции обрабатываемого материала на воздействие режущего клина при околосвуковой и звуковой скоростях. Именно к таким скоростям приближается современная технология шлифования, рабочие скорости которой на два-три порядка превышают достигнутый уровень в лезвийной обработке.

Перспективы и целесообразность применения высоких и сверхвысоких скоростей при обработке резанием можно оценить с помощью положений теории дислокаций. Резание материалов идентифицируется с процессом их пластического деформирования. Поэтому увеличение скорости резания прямым образом зависит от возможности повышения скорости пластической деформации.

*Предельная скорость пластической деформации.* Чтобы повысить скорость деформации, необходимо увеличивать действующую нагрузку. Если при скорости деформации до  $\dot{\epsilon}=10\text{с}^{-1}$  напряжение деформирования возрастает незначительно, то при скорости деформации свыше  $10^4\text{с}^{-1}$  характер кривой напряжение-деформация изменяется радикально (рис. 2) [3].

На рис. 3 представлены зависимости скорости деформации от действующего напряжения при деформировании, как и на рис. 2, высокочистого алюминиевого сплава. Из рис. 3 следует, что напряжение текучести как функция деформации возрастает с увеличением скорости деформации. По приведенным результатам можно заключить, что в

исследованном интервале деформаций и скоростей деформаций существует предельная скорость пластической деформации, равная примерно  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ , при которой экспериментальные кривые параллельны оси абсцисс, т.е. не зависят от действующего напряжения.

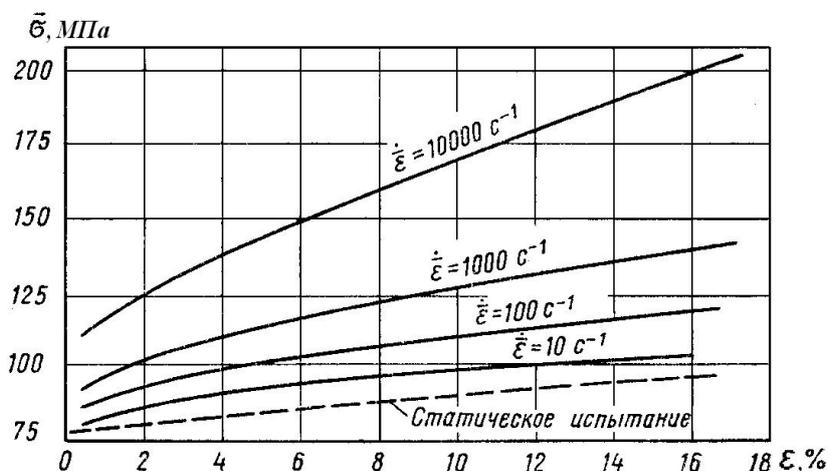


Рисунок 2 – Зависимость напряжения от деформации при постоянной скорости деформации для алюминия высокой чистоты [3]

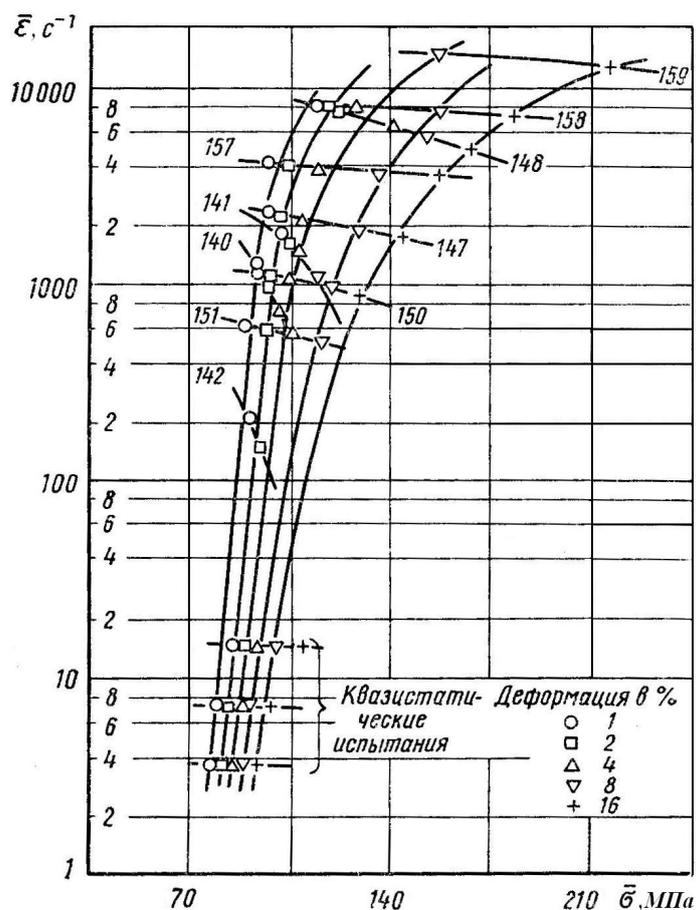


Рисунок 3 – Зависимость скорости деформации от напряжения при постоянной величине деформации (показаны образцы экспериментальных записей) [3]

В работе [3], в которой приводятся эти данные, дано объяснение установленному характеру связи  $\dot{\epsilon}$  -  $\sigma$  процессом пересечения дислокаций, как механизма, контролирующего скорость деформации. В связи с чем делается предположение, что предельно достижимой скоростью деформации является предельно возможная скорость движения дислокаций.

При высокоскоростной деформации с чрезвычайно высокими значениями приложенного напряжения резко возрастает скорость перемещения дислокаций по плоскости скольжения. В результате соответствующего увеличения сопротивления кристаллической решетки ускоренному движению дислокаций обеспечивается дополнительный прирост прочности при высокоскоростной деформации по сравнению с квазистатическим деформационным упрочнением.

Ранее упоминалось, что материал деформируется путем движения краевых и винтовых дислокаций, причем скорость перемещения краевых дислокаций до 50 раз больше, чем винтовых. Возможность более быстрого движения краевых дислокаций обычно объясняют их способностью оставаться в пределах одной плоскости скольжения. Но винтовых дислокаций с точки зрения статистической физики в деформируемом объеме зарождается до 2 раз больше, чем краевых, поскольку энергетических затрат на их зарождение требуется меньше. Поэтому пластическая деформация протекает как процесс одновременного зарождения и движения краевых дислокаций, которых меньше, но двигающихся с более высокой скоростью, и винтовых дислокаций, которых, однако, имеется в большем количестве, чем быстрых краевых дислокаций.

Можно, по-видимому, утверждать, что при относительно небольших скоростях деформаций процесс деформирования протекает преимущественно в результате движения медленных винтовых, но энергетически более предпочтительных, чем краевые дислокации. С повышением скорости деформации приоритет в ее реализации все более смещается в сторону активности быстрых краевых дислокаций, тем более, что возрастающая нагрузка деформирования обеспечивает необходимые предпосылки для их инициирования в возрастающих количествах.

Теперь необходимо найти ответ на вопрос, как быстро может перемещаться дислокация, чтобы обеспечить предельную скорость пластической деформации, и может ли она достигать, например, скорости звука в деформируемом материале?

На существование критической скорости движения дислокации, величина которой меньше скорости звука, впервые указали Я.И. Френкель и Т.А. Конторова.

Действительно, такой вывод следует из уравнения волновой механики сплошных сред для малых пластических деформаций, где уравнение движения имеет вид

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время,  $c$  – скорость волн сдвига в данной среде или скорость звука.

Во-первых, скорость дислокации не может превышать скорости звука, т.к. дислокация – это по существу сигнал, который можно разложить методом Фурье на плоские волны деформации (звуковые волны или фотоны). Но, как известно, сигнал не может перемещаться быстрее волн, которые его переносят.

Во-вторых, практический предел скорости достигается, когда энергия, которую движущаяся дислокация получает от прилагаемой нагрузки, компенсируется той энергией, которую дислокация теряет вследствие различных диссипативных процессов. Поэтому предельная скорость движения дислокации и, соответственно, пластической деформации не может достигнуть скорости звука.

В предыдущем тексте представленной монографии уже излагались различные точки зрения на скорость перемещения дислокаций. Отметим, что по теории дислокаций скорость движущихся дислокаций должна быть ограничена скоростью поперечных волн сдвига, величина которой рассчитывается через отношение модуля сдвига деформируемого материала к его плотности. Эта величина меньше скорости звука, за которую принято считать скорость распространения продольных звуковых волн, вычисляемых через отношение модуля упругости и плотности.

Эшелби, Виртман, Окави и другие исследователи привели ряд теоретических соображений, из которых следует, что краевые дислокации могут иметь сверхзвуковые скорости перемещения [4].

Например, была предложена схема сверхзвуковой краевой дислокации. По Эшелби атомы, расположенные выше плоскости скольжения, могут занимать два положения (рис.4). Справа от дислокации, обозначенной на рисунке через А, положение неустойчивое, а слева от него устойчивое. Положение атомов справа от А может быть изменено, если они переместятся влево и займут устойчивое положение. Энергия неустойчивого положения атомов в кристаллической решетке создает необходимую движущую силу, которая определяет перемещение дислокаций. Если все атомы, расположенные справа от А, одновременно переместятся из своих

неустойчивых позиций, то дислокация будет двигаться в направлении, указанном стрелкой, с бесконечно большой скоростью.

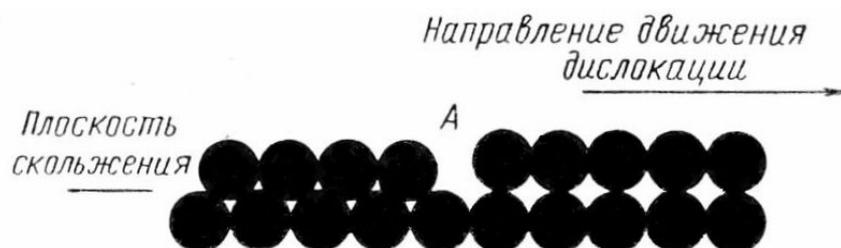


Рисунок 4 – Образование сверхзвуковой дислокации по Эшелби.

В действительности же пока отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие существование сверхзвуковых дислокаций, а исследованные скорости движения дислокаций в дозвуковом интервале не достигают скорости звука по крайней мере на порядок.

*Предельная скорость разрушения.* Разберем некоторые теоретические аспекты повышения скорости разрушения металлов, которая сопровождается предшествующей ему пластической деформацией.

Из опытов известно, что существует критическая скорость распространения трещин, выше которой не происходит пластической релаксации [5, 6, 7].

Движущей силой распространения трещины является энергия деформации  $W$ , которая уравнивается поверхностной энергией  $\gamma$  и кинетической энергией  $E_k$

$$E_k = \beta \frac{\dot{\epsilon}^2}{c_0^2 W}, \quad (2)$$

где  $c_0$  – скорость волн напряжения и  $\beta$  – постоянная, связанная с разделением поверхностей трещины.

Тогда предельная скорость распространения трещины Гриффитса равна

$$V_c = \beta c_0 \left[ 1 - \frac{\gamma}{W} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

и составляет около 1/3 скорости звука в материале.

Выше предельной скорости распространения трещины необходимая энергия разрушения составит

$$U_p \approx 2\gamma \approx 0,2aG. \quad (4)$$

Такую величину энергии, необходимую для разрыва атомных связей, можно получить в результате концентрации напряжений в локализованной области разрушения. Необходимый эффект может быть получен в результате повышения скорости воздействия инструмента, что обеспечит повышенную плотность поступающей энергии.

Действительно, при значительном увеличении скорости воздействия неоднородность напряженного состояния в объеме несколько резко увеличивается, что возникают локальные сильно деформированные зоны, только непосредственно прилегающие к месту воздействия.

Следовательно, при повышении скорости воздействия свыше предельной скорости распространения трещины разрушение будет являться абсолютно хрупким. Скорости распространения волн напряжения в твердых телах заключены приблизительно в интервале от 900 до 6000 м/с, предельная же скорость распространения трещин лежит в пределах 1500...2000 м/с. Таким образом, область абсолютно хрупкого разрушения, когда справедливо выражение (4) примерно составляет  $2000 < V_c < 6000$  м/с.

С другой стороны, скорость звука в физике твердого тела рассматривается по существу как сигнал, который переносится в периодической атомной структуре волнами деформации. При скорости выше скорости распространения сигнала, разрушение можно рассматривать как сдвиг путем мгновенного разделения атомных слоев вдоль всей плоскости разрушения. Необходимая энергия разрушения в этом случае может быть определена из схемы жесткого сдвига двух атомных плоскостей.

Сила, необходимая для того, чтобы сдвинуть верхнюю атомную плоскость относительно нижней, является периодической функцией с периодом  $a$  и симметричной для  $x > 0$  и  $x < 0$ . Простейшая функция, удовлетворяющая этим условиям, в теории упругости есть

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{Ga^3}{2\pi d} \sin \frac{2\pi x}{a}, \quad (5)$$

$$U_p = \int F dx = -\frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \cos \frac{2\pi x}{a} + C. \quad (6)$$

при  $x = 0$ ,  $C = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d}$

$$U_p = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right), \quad (7)$$

с максимумом

$$U_p = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \quad (8)$$

По расчетам энергия разрушения при скорости свыше скорости звука будет в 4 раза меньше энергии разрушения в интервале скоростей  $V_c < V < V_{зв}$ . В данном случае следует, однако, говорить лишь о снижении сопротивления обрабатываемого материала разрушению, так как достижение высоких скоростей инструментом требует больших затрат энергии.

Возможность разрушения металлов при сверхзвуковых скоростях рассматривает и волновая механика сплошных сред, исследуя разрушение металла как результат действия напряжений высоких амплитуд. В этом случае амплитуды напряжений превышают на несколько порядков значения начальных пределов текучести и становятся сравнимыми, или даже превышают значение модуля упругости. Сопротивление среды принимается почти пренебрежимо малым при описании природы движения, а механическое поведение материала аппроксимируется как поведение жидкости.

Повышение скорости разрушения выше скорости звука интересно и с другой точки зрения. Как известно, скорость распространения тепловых волн определяется скоростью звука. Поэтому следует ожидать при сверхзвуковых скоростях «отставание» теплового потока. На практике это подтверждается уменьшением коэффициента теплопроводности металлов с увеличением скорости обработки.

Известны также и теоретические предложения о предельной скорости разрушения [8]. С учетом кинетической энергии трещины максимально возможная скорость распространения разрушения в твердом теле по Мотту составляет 0,38 от скорости звука, а в рамках чисто упругой задачи П.О. Пашковым этот предел увеличен до 0,4 скорости звука.

При использовании идеи о том, что предельная скорость трещины лимитируется величиной скорости, при которой начинается процесс ее ветвления, были получены различные оценки предельно возможной скорости разрушения от 0,53...0,8 скорости поперечных волн и 0,5...0,65 скорости продольных волн.

В.М. Финкель [8], проанализировав результаты измерений скоростей разрушения приведенных в 30 опубликованных источниках, пришел к выводу, что наибольшие из известных скоростей разрушения приближаются к скорости, составляющей 0,38 скорости продольных упругих волн в стали. Этот вывод получен на широком круге материалов:

хрупких (стекло, монокристаллы, алмазы и др.) и пластичных (углеродистые и легированные стали).

При разрушении сталей типа Ст 3, 25,35, 50, 65, У8А, 35ХГ2, ШХ15, 85ХВ, 65Г, трансформаторная сталь с содержанием углерода в 3,5% и др. скорость распространения трещины, измеренная по различным методикам, в большинстве случаев указывается в диапазон от 1117 до 3000 м/с, что составляет 0,17...0,51 скорости звука, соответствующей конкретному испытанному материалу. Только в одном случае из 22 исследованных вариантов зарегистрированная скорость разрушения достигла значений 4000...5000 м/с или 0,71...0,91 от скорости звука.

Тем не менее, автор исследования [8] утверждает, что экспериментально пока не обнаружено какой-либо предельной скорости, выше которой пластическая деформация отсутствовала, а наблюдалось монотонное ее убывание с увеличением скорости трещины вплоть до предельно возможных скоростей.

Трещина, распространяющаяся с некоторой скоростью, возбуждает дислокационные источники в окрестностях своей вершины и освобождает их от влияния примесей. С ростом скорости трещины время ее воздействия на источники уменьшается, что ведет к уменьшению пластической деформации вблизи трещины и в конечном итоге на полостях разрушения. Это объяснение позволяет объяснить механизм существования пластической деформации даже при очень больших скоростях распространения трещины в реальных материалах, т.е. с наличием примесей или предварительно деформированных. Если бы в материале вблизи движущейся трещины отсутствовали источники дислокаций, то описанный механизм лишается смысла. Тогда должна существовать некоторая критическая скорость, выше которой зарождение дислокаций движущейся трещиной было бы исключено, а разрушение только в этом случае можно рассматривать как абсолютно хрупкое.

При разрушении металлов возможно отсутствие или второстепенное влияние источников дислокаций вблизи движущейся трещины. Основная причина уменьшения пластической деформации в вершине трещины с возрастанием ее скорости – инерция незаблокированных дислокационных источников Франка-Рида.

Несмотря на то, что известные эксперименты свидетельствуют о предельных значениях скоростей разрушения, Г.Н. Баренблатт, В.М. Финкель и др. полагают, что вершину трещины можно ускорить и до более

высоких скоростей, если бы удалось обеспечить каким-либо образом ее дополнительное энергоснабжение.

*Предельная скорость резания.* Теперь необходимо привести к единому знаменателю представленные выше рассуждения о влиянии скорости на пластическую деформацию и разрушение, объединив их для установления предельно возможной скорости резания как процесса управляемого разрушения.

Прежде всего еще раз идентифицируем процесс резания как управляемого разрушения, определив его основные признаки. При управляемом разрушении формирование новых поверхностей является результатом бифуркации обрабатываемого материала вершиной движущейся трещины, профиль которой конгруэнтен или совпадает с профилем режущей кромки.

Для того, чтобы траектория движения вершины трещины соответствовала плоскости резания, заданной кинематикой процесса, необходимо сохранение ее управляемости. Управляемость траектории трещины обусловлена механизмом вязкого разрушения, т.е. при наличии пластической деформации, которая формирует и сопровождает ее движение. При отсутствии пластической деформации характер разрушения становится непредсказуемым.

При повышении скорости резания важно не перейти рубеж, когда образующаяся трещина не начнет ветвиться или спонтанно изменять траекторию своего движения, т.е. войти в скоростной диапазон абсолютно хрупкого разрушения. Такая возможность, как показал анализ, вполне возможна при резании пластичных металлов и сплавов.

Основываясь на существующих теоретических положениях и известных экспериментальных данных, можно принять за величину предельной скорости резания скорость, при которой еще сохраняется пластическая деформация обрабатываемого материала и соответственно функционируют механизмы ее порождающие и поддерживающие.

В этой связи наиболее достоверной границей скорости резания как процесса управляемого разрушения можно принять скорость движения дислокаций, ограниченной скоростью поперечных волн сдвига. Такая оценка соответствует современным представлениям физики твердого тела и находит подтверждение, в том числе, немногочисленными экспериментальными данными по сверхскоростному резанию.

Тогда возможную скорость резания как управляемого технологического процесса съема материала можно ограничить отношением:

$$V \leq \sqrt{\frac{G}{E}} V_{36} \quad (9)$$

Если воспользоваться справочными данными табл. 5.2, то оказывается, что предельная скорость резания составляет 0,6...0,62 от скорости звука в различных конструкционных металлах.

Подчеркнем, что оценка по (9) соответствует существующим общепринятым представлениям о пластической деформации и разрушении материалов. Гипотезы, которые упоминались выше, позволяют отодвинуть границу предельной скорости еще дальше, но их реальность пока не обоснована.

Для основных конструкционных металлов и сплавов на основе Al, Fe, W, Cu, Ni, Ti и других скорость распространения звука в них составляет 3600...5300 м/с и соответственно предельная скорость их обработки резанием может достигать величин 2200...3300 м/с. Это очень высокий уровень, который более, чем на порядок превышает достигнутые скорости резания к настоящему времени.

Рассмотрим теперь физические предпосылки реакции обрабатываемого материала в условиях сверхскоростного резания. Будем исходить из очевидного утверждения, что с увеличением скорости обработки объем пластических деформаций, предшествующих разрушению, уменьшается, а роль собственно процесса разрушения в энергетическом балансе возрастает.

Разрушение – это процесс, в результате которого края формирующейся трещины раздвигаются на расстояние  $b$ , равное по порядку величины межатомному расстоянию  $a$ . Энергия, которая затрачивается на сопротивление распространению трещины в результате пластической релаксации, определяется выражением [9]

$$W \approx \frac{\sigma_c \cdot b}{\pi(1-\mu)} \ln \frac{R}{b}, \quad (10)$$

где  $\sigma_c$  – предел упругости, численно совпадающий с величиной предела пропорциональности,  $R$  – размер пластической зоны вокруг трещины

$$\frac{R}{b} \approx \frac{G}{\sigma_c}.$$

Ширина трещины  $b$  может быть вычислена из уравнения Гриффитса для полного изменения энергии трещины

$$\Delta U = 2\gamma \cdot h - \frac{1}{8}\pi(1-\mu)\frac{\sigma^2 b^2}{G} . \quad (11)$$

В уравнении (11) величина  $\sigma$  является напряжением, необходимым для образования дислокации

краевой: 
$$\sigma = \frac{Gb}{2\pi(1-\mu)l} \quad (12)$$

винтовой: 
$$\sigma = \frac{Gb}{2\pi l} , \quad (13)$$

где  $l$  – длина дислокации.

Трещина образуется, если величина энергии  $\Delta U$  по (6.80) меньше нуля и, следовательно, при выполнении условия

$$\sigma^2 h > \frac{16G\gamma}{\pi(1-\mu)} .$$

Если рассматривать трещину как сверхдислокацию, то при  $\mu = 1/3$  получим следующие условия формирования устойчивой трещины

$$b_{\min} \approx 3,7 \cdot \sqrt{ah} , \quad (13)$$

$$b_{\min} \approx 5,5 \cdot \sqrt{ah} , \quad (14)$$

которые соответственно получены для краевой и винтовой дислокаций. Минимальная ширина трещины не может быть меньше межатомного расстояния  $a$ , т.е.  $b_{\min} \geq \bar{a}$ . В предположении о преобладающем влиянии винтовых дислокаций на процесс высокоскоростного разрушения, а также, соблюдая обязательное условие кратности величины вектора Бюргера межатомному расстоянию, принимаем для расчетов значение  $b_{\min}$ , равное  $6a$ .

В табл. проводятся расчетные значения минимальной энергии, необходимой для образования  $1 \text{ см}^2$  новой поверхности для некоторых металлов. В табл. приведена также теоретическая оценка удельной энергии пластической деформации, приведенная к единице объема деформируемого металла.

Ее величина рассчитана с учетом следующих допущений. Дислокации распределены в кристалле беспорядочно как по положению,

так и по знаку. Их перемещение осуществляется также по закону чистой случайности, что подтверждено прямыми экспериментами и на реальных металлах. Чтобы осуществить работу пластической деформации, дислокации должны переместиться на заметное расстояние  $\lambda$ , которое принимается постоянным для всех стадий деформирования. При своем движении дислокации испытывают сопротивление упругих полей соседних дислокаций. Энергия поля напряжений от дислокаций в деформируемом металле с учетом периодичности их распределения описывается зависимостью (при  $b=a$ )

$$U = \int \frac{Ga^3}{2\pi r} \left| \sin \frac{r\alpha}{\pi} \right| d\alpha, \quad (15)$$

в которой периодичность поля упругих напряжений, равная среднему расстоянию между соседними дислокациями, принята в виде функции  $\left| \sin \frac{r\alpha}{\pi} \right|$ .

Энергия поля напряжений от единичной дислокации определяется из (6.85) при условии  $x=r$

$$U = \frac{Ga^3}{2\pi} K,$$

где

$$K = \int_0^\pi \frac{\sin \left| \frac{\alpha^2}{\pi} \right|}{V} d\alpha.$$

Значение коэффициента  $K$  вычисляется по формуле с помощью подстановки  $\alpha^2=y$ ,  $x = \pm\sqrt{y}$ ,  $2\alpha dx = dy$ ;  $d\alpha = \frac{dy}{2\alpha}$ . Решением величина  $K$  получается равной 0,925.

Перемещаясь на среднее расстояние  $\lambda$ , дислокация  $\frac{\lambda}{r}$  раз преодолевает поле упругих напряжений единичной дислокации. Т.к. в единице объема деформируемого металла находится  $r^{-3}$  подвижных дислокаций, то энергия деформирования указанного объема будет равна

$$U_{нл} = K \frac{Ga^3}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{r} \cdot \frac{1}{r^3} = K \frac{Ga^3}{2\pi} \lambda \rho^2. \quad (16)$$

Если подставить в (16) значение плотности дислокаций  $\rho$ , то получим расчетную зависимость удельной энергии пластической деформации от степени деформации  $\varepsilon$

$$U_{nl} = \frac{K}{2\pi} \frac{Ga}{\lambda} \varepsilon^2. \quad (17)$$

По зависимости (17) энергия деформирования единицы объема связана с длиной прогиба дислокаций  $\lambda$  и степенью деформации  $\varepsilon$ . Достижение критических условий деформирования, когда начинает развиваться процесс разрушения, для каждого металла предопределено характеристическими значениями  $\lambda$  и  $\varepsilon$ . Предельная скорость деформации, например, определяется как максимально возможные значения относительно удлинения  $\delta$  или относительного сужения  $\psi$  при растяжении. Длина пробега дислокаций  $\lambda$ , являясь переменной величиной на всех стадиях деформирования, уменьшается перед разрушением до минимального значения, соответствующего для состояния с предельной плотностью дислокаций.

Степень деформации и длины пробега дислокаций взаимосвязаны: с увеличением  $\varepsilon$  уменьшается величина  $\lambda$ . Если принять значение  $\lambda=2 \cdot 10^{-3}$  мм и  $\varepsilon=0,5$ , близкие к реальным, а теоретический объем пластической деформации, необходимый для управляемого разрушения, равным  $b_{\min}$ , то получим затраты энергии  $U_{nl}$ , приведенные в табл.

Таблица – Плотность энергии разрушения для формирования  $1\text{см}^2$  новой поверхности

Металл	$U_p$ (6.77)	$2\gamma$ (6.73)	$W$ (6.79)	$U_{пл}$ (6.87)
	$\alpha 10^{-4} \text{Дж/см}^2$			$\alpha 10^{-21} \text{Дж/см}^{-3}$
Алюминий	0,99	0,83	0,16	1,8
Медь	2,40	2,0	0,40	4,4
Железо	2,38	2,0	0,38	5,6
Вольфрам	7,95	4,1	3,85	9,1

Теоретические оценки энергии разрушения при условиях сверхскоростного резания отличаются между собой, но безусловным и очень важным выводом из информации, представленной в табл., является факт, что участие пластической деформации в формировании новой поверхности становится исчезающе малым, которое не оказывает влияния на энергетику процесса.

Этот вывод основан на положениях дислокационной физики деформирования и разрушения без учета трения, роль которого может заметно увеличиться с повышением скорости резания.

В случае локализации энергии разрушения, пропорциональной скорости обработки, с новым интенсивным источником теплообразования от внешнего трения на поверхностях контакта температура обрабатываемого материала может увеличиться до значений  $0,4 \dots 0,5$  его температуры плавления и более. Тогда все больше начнут себя проявлять самодиффузионные процессы, что может в принципе привести к пластической деформации и без дислокаций. При определенных условиях взаимодействие дислокационного скольжения с диффузионными процессами может привести к эффекту сверхпластичности, т.е. к очень низкому сопротивлению деформированию при чрезвычайно высокой пластичности металла.

И еще одно важное обстоятельство, связанное с нагревом зоны резания. С увеличением скорости обработки до значений, приближающихся к скорости звука, начнет активно проявляться эффект запаздывания теплового потока. При достижении некоторого значения скорости резания он начнет отставать от движущейся режущей кромки. В качестве примера можно привести эффект отставания звуковой волны от самолета, летящего со сверхзвуковой скоростью.

**Список литературы:** 1. *Силин С.С.* Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с. 2. *Потапов В.А., Айзеншток Г.И.* Высокоскоростная обработка. – Обзорная информация/ВНИИТЭМР. М., 1986. 60 с. 3. *Томсен Э., Янг Г., Кобаяши Ш.* Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969, 503 с. 4. *Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А.* Высокоскоростная деформация и структура металлов. М.: Металлургия, 1971. 197 с. 5. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / отв. ред. В. С. Иванова. М.: Наука, 1965. 180 с. 6. *Старков В.К.* Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 160 с. 7. *Финкель В. М.* Физические основы торможения разрушением. М.: Металлургия, 1977. 359 с. 8. *Финкель В. М.* Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с. 9. *Фридель Ж.* Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.