

12. Литошенко Н.В. Закономірність впливу залишкових термічних мікронапружень та дисперсії розмірів карбідних зерен на деформаційні характеристики твердих сплавів WC-Co: Автореф. Дис.- К.:ІНМ ім.В.М.Бакуля НАН України, 2002.
13. Исследование механизма разрушения твердосплавных деталей камер высокого давления //Исследование и разработка твердых сплавов. Сб. науч. т./ И.В. Кобицкой, В.И. Третьяков, Т.А. Емельянов и др. –К.: ВНИИЕС, 1988.– С. 14–18.

Надійшла 28.04.11

УДК 621.9

К. В. Баннов, А. В. Градобоев, д-р техн. наук, В. С. Матвеев

*Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,
Российская Федерация*

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НАПРАВЛЕННОМ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ РЕЗАНИИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Предложена физическая модель направленного разрушения металлов резанием. Оценены скорость деформации металла и температура, развивающиеся в зоне разрушения.

Ключевые слова: *направленное разрушение, скорость деформации, резание металлов, стружка.*

Результаты анализа многочисленных исследований по деформированию и разрушению металлов позволяют убедиться в следующем:

- любые твердые тела при воздействии на них больших давлений и температуры приобретают высокую пластичность, а в отдельных случаях сверхпластичность;
- если в процессе воздействия скорость деформации металла превышает пороговое значение $\dot{\epsilon}_i \geq 10^3 \text{ с}^{-1}$, поведение металла в зоне воздействия можно описать с позиций гидродинамики;
- при определенной критической температуре, давлении и скорости деформации могут происходить фазовые превращения и изменения агрегатного состояния металла.

Проблема разрушения металлов довольно актуальна. Поскольку процесс резания является ярким примером управляемого разрушения, перечисленные явления наблюдаются и в этом случае.

Цель настоящей работы – на основе наблюдаемых при разрушении металлов гидродинамических представлений, [1; 2], разработать физическую модель разрушения металлов резанием.

В целях проверки возможности применения такого подхода оценивали скорость деформации металла $\dot{\epsilon}_i$ и температуры, развивающиеся в зоне разрушения. Решение этой задачи позволит разработать корректную теплофизическую модель разрушения металлов резанием, а также оценить коэффициент полезного действия этого процесса.

Процесс резания металлов следует рассматривать как *направленное разрушение*, происходящее по поверхностям резания, определяемых кинематикой процесса [1]. Процесс разрушения происходит в две стадии:

- накопление энергии в зоне направленного разрушения металла;
- разрушение доведенного до псевдожидкого состояния металла, при котором происходит взрывной сброс накопленной энергии.

Под псевдожидким состоянием металла следует понимать его состояние в виде жидкости высокой вязкости, с фрагментами твердого тела.

Схема примененного для расчетов сливного стружкообразования показана на рис. 1. Принципиальное отличие этой схемы от схемы, представленной в [2] состоит в том, что стружка движется от зоны направленного разрушения под углом $\Delta\gamma_{\text{хв}}$ (точки 15–11–13, на рис. 1) к передней поверхности металлорежущего инструмента. Кроме того, очертания контактной пластической области содержат лобовой и хвостовой участки. При этом положение лобового участка задается углом $\nu\gamma$, а хвостового – углом $\Delta\gamma_{\text{хв}}$. Максимальная высота лобового участка, отсчитываемая по перпендикуляру к передней поверхности, определяется величиной h_{Σ} , толщина модифицированного слоя в стружке задается как h_n .

Используя экспериментальные значения, примем $h_{\Sigma} \approx 0,1a_1$; $h_{||} \approx 0,1h_{\Sigma}$. Длина зоны пластического деформирования в направлении разрушения определяется как расстояние от начальной границы зоны стружкообразования до конечной и сопоставима с толщиной стружки a_1 .

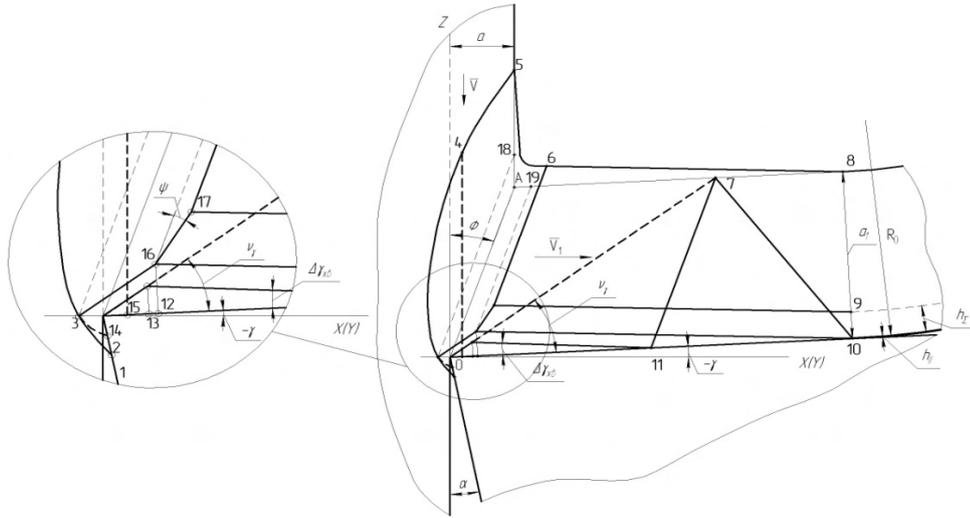


Рис.1. Схема сливного стружкообразования в процессе направленного разрушения металлов резанием

В зоне пластической деформации (участок 4–14 на рис. 1) степень деформации металла изменяется от максимального значения у передней поверхности зоны до нуля в ее конце, максимально удаленном от режущей кромки. При этом материальная точка 4 проходит всю зону пластической деформации за время τ . Тогда скорость деформации

$$\dot{\epsilon}_1 = 17 \cdot \frac{V}{a} \cdot \zeta \cdot \frac{l}{a_1} \cdot \frac{e_{i\max}}{e_{i\text{cp}}} \quad (1)$$

где V – скорость резания, м/мин; a – толщина срезаемого слоя, мм; ζ – усадка срезаемого слоя по длине; l – длина пути материальной точки в пределах области локализованной пластической деформации в окрестностях условной плоскости сдвига, мм; a_1 – толщина стружки, мм; $e_{i\max}$, $e_{i\text{cp}}$ – степень пластической деформации соответственно максимальная и средняя.

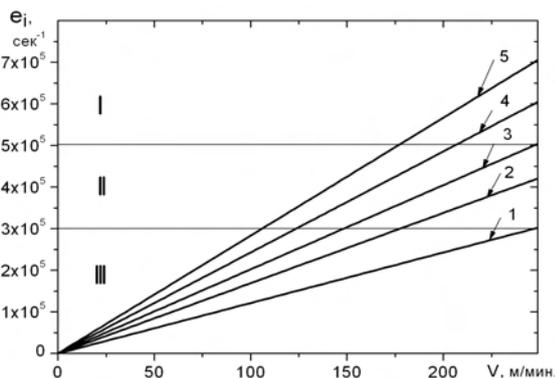


Рис. 2. Расчетные зависимости скорости деформации от скорости резания при различных значениях усадки срезаемого слоя металла по длине (l), 1 – $\zeta = 1,5$; 2 – $\zeta = 2$; 3 – $\zeta = 2,5$; 4 – $\zeta = 3$; 5 – $\zeta = 3,5$

скорости деформации (область II), при которых, согласно [1] поведение металла описывается законами гидродинамики.

Уравнение (1) показано на рис. 2 в графическом виде для наиболее часто наблюдаемых значений усадки срезаемого слоя по длине.

Напомним, что ζ является основной интегральной характеристикой стружкообразования на заключительном этапе направленного разрушения металлов резанием.

Известные экспериментальные данные [3] в сопоставлении с оценками, полученными по формуле (1), показаны на рис. 3 и приведены в таблице.

Результаты, представленные в левой части таблицы, получены при скорости резания 100 м/мин, $\gamma = 17^\circ$ для отожженной стали 2Х13, результаты в правой части таблицы – для этой же стали при скорости резания 55 м/мин и толщине срезаемого слоя по длине 0,305 мм.

Как видим, наблюдается хорошая корреляция между расчетными и экспериментальными данными.

На рис. 2 выделены характерные значения

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений скорости деформации

a , мм	0,1	0,33	0,39	γ , град	5	17	22
Эксперимент							
$\dot{\epsilon}_i$, с ⁻¹	12000	8500	7000	$\dot{\epsilon}_i$, с ⁻¹	7000	6000	3200
Теория							
$\dot{\epsilon}_i$, с ⁻¹	11000	7900	6900	$\dot{\epsilon}_i$, с ⁻¹	6800	5900	3100

Таким образом, можно однозначно утверждать, что при параметрах резания, соответствующих области I (см. рис. 2), металл в зоне направленного разрушения находится в псевдожидком состоянии и его поведение описывается законами гидродинамики.

Такой вывод вполне распространим и на область II (см. рис. 2). Для области III можно предположить, что будет наблюдаться идентичное состояние металла в микрообъеме, который будет прижиматься к режущим кромкам инструмента.

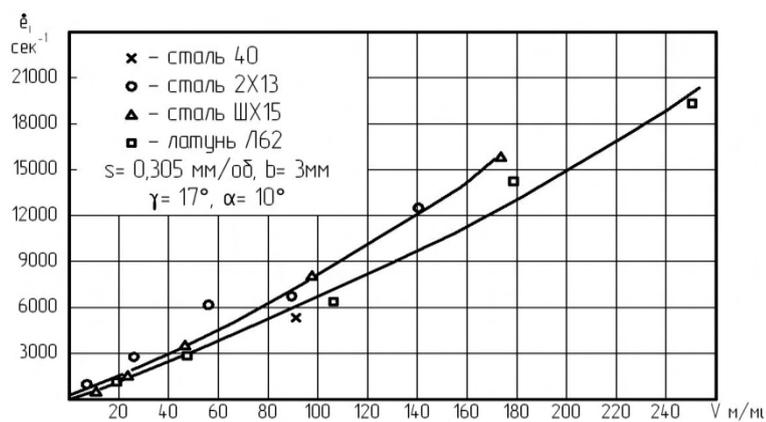
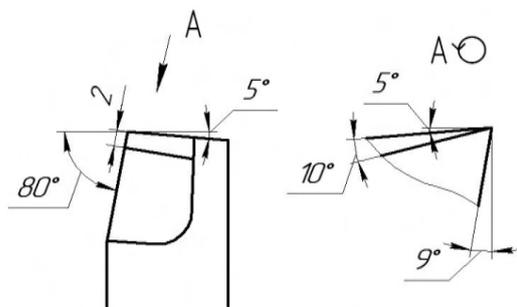


Рис. 3. Экспериментальные зависимости скорости деформации от скорости резания [3]



$\lambda=0$ (угол наклона главной режущей кромки)

Рис. 4. Конструкция используемого в экспериментах инструмента

положенной в направлении вектора схода стружки, с гарантированным выходом за пределы длины контакта (рис. 4, обозначения общепринятые).

Такая конструкция инструмента позволяет предположить возможность вывода части расплава с контактной поверхности стружки в пределах длины пластического контакта. Именно в этой части стружки следует ожидать формирование уса, как показано на рис. 5.

Эксперименты проводили при наружном несвободном прямоугольном точении инструментом описанной конструкции. В качестве обрабатываемого материала использовали широко применяемую сталь 45. Для экспериментов использовали как универсальные токарно-винторезные станки 1К62 и КУСОН со ступенчатым регулированием скорости резания V и подачи s , так и токарный станок с ЧПУ 16К20Ф3 с бесступенчатым регулированием режимов резания (V , s). Особо отметим, что режимы резания выбирали так, чтобы исключить наростообразование. Глубина резания во всех случаях составляла $t = 4$ мм. Все эксперименты проводили без применения смазывающего-охлаждающих технологических средств.

Приведенные гидродинамическая модель направленного разрушения металлов резанием и оценки убеждают, что в процессе резания металлов проявляются гидродинамические явления.

Практическим доказательством этого могла бы служить возможность вывода части расплава из внутренней контактной зоны стружки, исключая граничные (боковые) условия. Назовем эту выведенную часть расплава срединным усом. Такое название дали для того, чтобы отличать этот вид усов от известных боковых усов, которые чаще всего наблюдаются при эксплуатации резцов с укороченной передней поверхностью (УПП). Следует отметить, что боковые усы, наблюдаемые ранее, появлялись случайным образом и их изучению не уделяли особого внимания.

Задача воспроизводимого формирования усов была решена следующим образом. Используя техническое решение, изложенное в [4], изготовили упрощенный вариант металлорежущего инструмента – токарного проходного резца. На резце сформировали ступеньку переменной высоты с началом формирования на главной режущей кромке, рас-

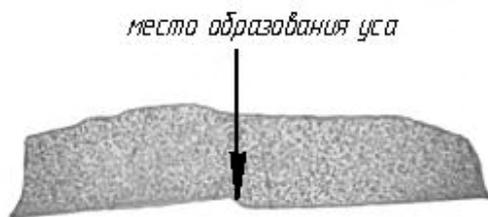


Рис. 5. Поперечное сечение стружки

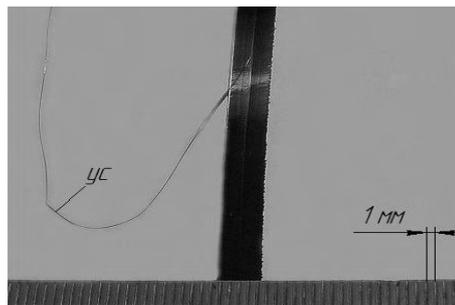


Рис. 6. Вид стружки с усом

Выполненные эксперименты подтвердили возможность гарантированного и воспроизводимого получения металлической стружки с усами при использовании разработанного инструмента. Фотографии типичной стружки с усами показаны на рис. 6.

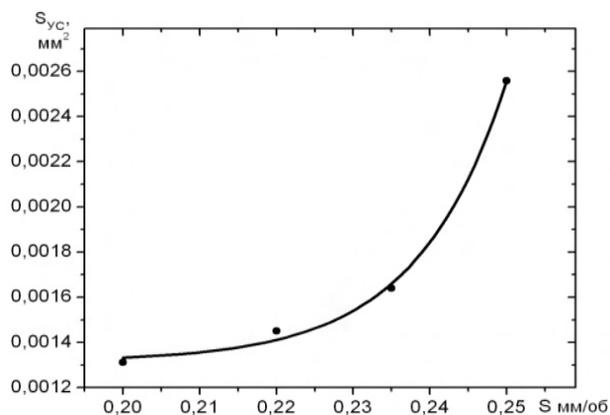


Рис. 7. Зависимость площади поперечного сечения уса S_{yc} от подачи S

Обычно длина получаемых таким образом усов составляет от нескольких миллиметров до десяти сантиметров в зависимости от режима резания. В поперечном сечении размеры усов составляют несколько десятков микрометров в зависимости от режимов резания, как на рис. 7, где показана зависимость площади поперечного сечения усов от подачи. Увеличение площади сечения усов свидетельствует об увеличении зоны локального плавления металла при резании с повышением подачи.

Рассмотрим физико-механические свойства усов. Типичное поперечное сечение срединного уса показано на рис. 8. Отчетливо видим, что ус имеет форму запятой, а внутри него видна пора. В процессе исследований сделали поперечные сечения на разных участках длины усов,

полученные при различных режимах резания. Поры присутствуют в каждом из нескольких десятков поперечных сечений при всех применявшихся режимах резания.

Возникновение пор (рис. 8) объясняется общеизвестными явлениями в металлургических процессах и при термической обработке металлов – возникновение усадочных раковин в отливках при остывании.

Значит, процесс формирования поры в срединных усах можно представить в виде модели «усадки» усов, как показано на рис. 9. В данном случае по аналогии с определением литейной усадки усадку уса определяли как отношение площади поры к площади поперечного сечения уса. В результате исследований установили, что усадка для усов изменяется в диапазоне $(3,2 \pm 1,2) \%$ и не зависит от режимов резания.

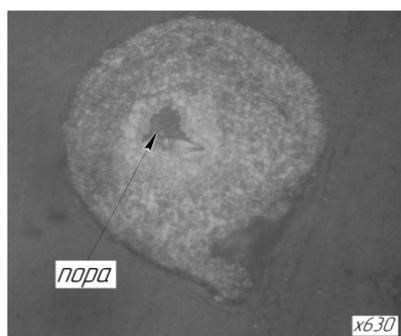


Рис. 8. Типичный вид поперечного сечения срединного уса

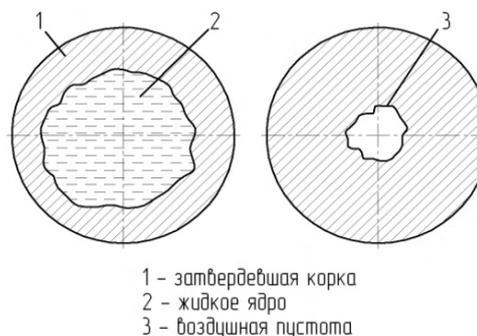


Рис. 9. Модель формирования усадочной раковины в усах

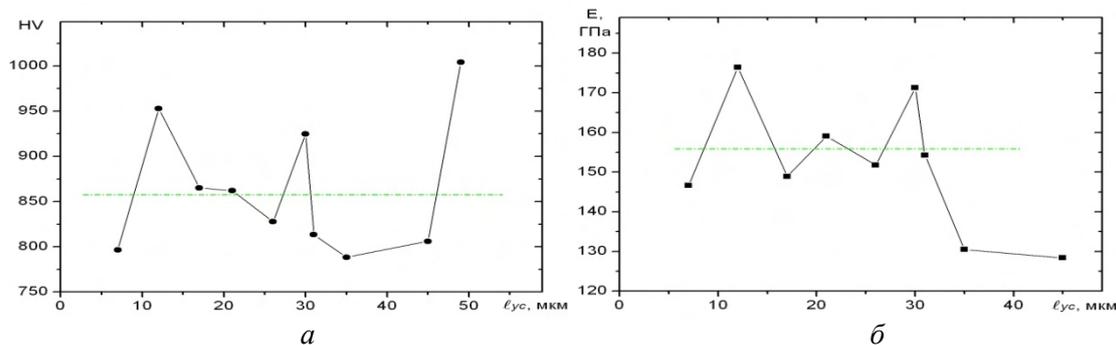


Рис. 10. Результаты измерений нанотвердости (а) и модуля упругости (б) по поперечному сечению уса (l_{yc} – расстояние от края уса)

Согласно [5] литейная усадка для используемой стали 45 составляет около 2,5 %. Такое совпадение значений является довольно убедительным доказательством того, что срединный ус при резании формируется из металла, находящегося в жидкой фазе.

Рассмотрим механические свойства полученных усов (рис. 10). Нанотвердомером “Nano Hardness Tester” фирмы CSEM измеряли нанотвердость по Виккерсу и модуль Юнга. Усредненное значение для усов нанотвердости $HV_{yc} \approx (840 \pm 70)$, модуль Юнга $E_{yc} \approx (155 \pm 20)$ ГПа, для тела стружки: $HV_{стружка} \approx (400 \pm 40)$, $E_{стружка} \approx (255 \pm 20)$ ГПа.

Таким образом, твердость срединного уса более чем в два раза превышает твердость основной толщины стружки, модуль упругости при этом уменьшается примерно в 1,5 раза. Особо отметим, что срединные усы, полученные при различных режимах резания, обнаруживают идентичные механические свойства. Это позволяет заключить, что срединные усы, формируемые при резании из металла в жидкой фазе, подвергаются в момент своего образования специфической термической обработке – закалке, которая обусловлена их быстрым охлаждением на воздухе.

Результаты механических испытаний на растяжение срединных усов показали, что прочность уса при растяжении в среднем в 10 раз меньше по сравнению с временным сопротивлением σ_v для стали 45 взятыми из справочных данных. Полученные результаты, можно объяснить неоднородностью размеров поперечного сечения срединного уса по длине, а также наличием большого количества концентраторов напряжений, связанных со структурной неоднородностью металла в срезаемом слое.

Следовательно, формирование срединного уса, наличие пор внутри уса и механические свойства усов подтверждают гипотезу о том, что в зоне направленного разрушения металлов резанием металл находится при температуре плавления в жидком состоянии.

В то же время, если металл на прирезцовой стороне стружки находится в жидкой фазе, тогда при контакте с окружающим воздухом в этой части стружки должен формироваться модифицированный слой, который будет характеризоваться специфическими механическими и структурными свойствами. Результаты исследования показали, что такой слой наблюдается при всех исследованных в работе режимах резания. Типичное поперечное сечение стружки с модифицированным слоем на прирезцовой поверхности (показан стрелкой) изображено на рис. 11.

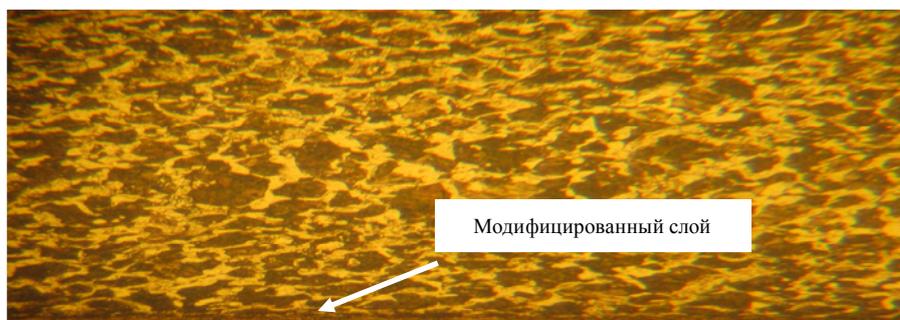


Рис. 11. Поперечное сечение стружки. Стрелкой показан модифицированный слой ($V = 150$ м/мин, $S = 0,5$ мм/об., $t = 4$ мм)

Указанный модифицированный слой характеризуется меньшими размерами зерна и специфическими механическими свойствами. В частности, результаты измерения нанотвердости и модуля упругости в поперечном сечении стружки показали, что твердость модифицированного слоя в два раза превышает твердость основной толщины стружки, а модуль упругости при этом меньше в 1,5 раза (рис. 12). Таким образом, механические свойства модифицированного слоя, формируемого на прирезцовой части стружки, идентичны механическим свойствам срединного уса и существенно отличаются от механических свойств исходной стали 45 и механических свойств металла основной толщины стружки.

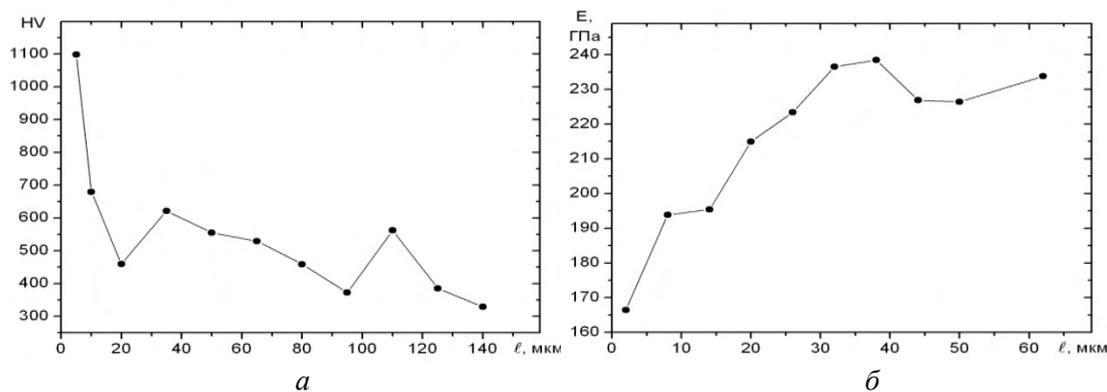


Рис. 12. Результаты измерения нанотвердости (а) и модуля упругости (б) по поперечному сечению стружки

В поперечном сечении размеры модифицированного слоя составляют несколько десятков микрон в зависимости от режимов резания, как на рис. 13, где зависимости толщины модифицированного слоя от подачи и скорости резания. Увеличение толщины модифицированного слоя свидетельствует об увеличении зоны локального плавления металла при резании с повышением подачи и снижением скорости резания.

Полученные результаты в целом позволяют утверждать, что появление модифицированного слоя является следствием термической закалки расплава металла на прирезцовой поверхности стружки, образующегося в зоне направленного разрушения металла резанием.

Следует особо отметить, что все эксперименты выполняли при расчетной скорости деформации 10^4-10^6 с^{-1} , что согласуется с данными [3].

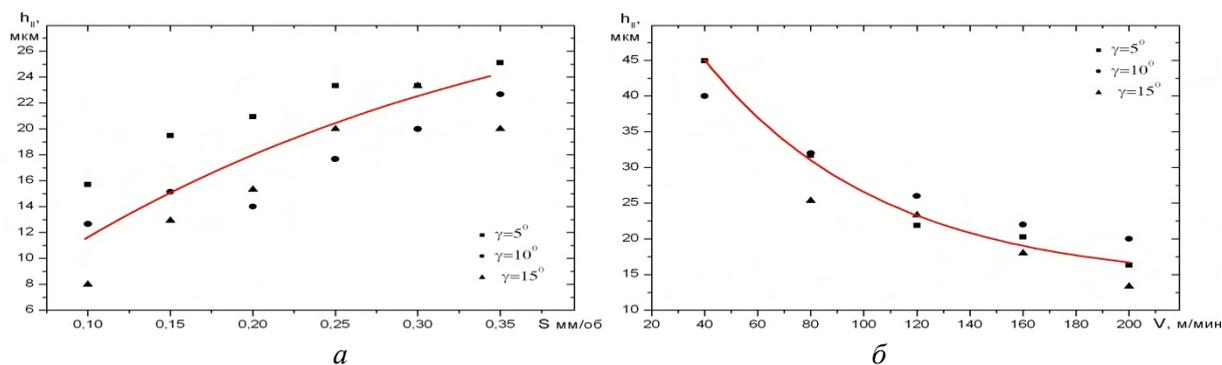


Рис. 13. Зависимости толщины модифицированного слоя h_{II} : а – от подачи ($V = 160 \text{ м/мин}$, $t = 2 \text{ мм}$); б – от скорости резания ($S = 0,25 \text{ мм/об.}$, $t = 2 \text{ мм}$)

Изложенное еще раз подтверждает выдвинутые предположения о том, что в зоне направленного разрушения металла резанием, металл находится в жидкой фазе.

Рассмотрение расчетной схемы (см. рис. 1) позволяет оценить в первом приближении объем зоны расплавления по формуле

$$Q = 2rh_{\Sigma}b, \quad (2)$$

где r – радиус скругления режущей кромки; h_{Σ} – толщина участка стружки с измененной степенью искривления текстуры; b – ширина срезаемого слоя.

Тогда в соответствии с первым законом термодинамики

$$\Theta = \frac{1000 A_w}{427 c C_p} + \Theta_0 \quad (3)$$

где A_w – удельная работа деформации в зоне расплавления, кг·мм/мм³; 427 – механический эквивалент теплоты, кг·м/ккал; ρ – удельная масса металла, г/см³; C_p – средняя удельная теплоемкость металла в диапазоне от 20 °С до текущего значения температуры в данной точке на пути деформации, кал/(град °С).

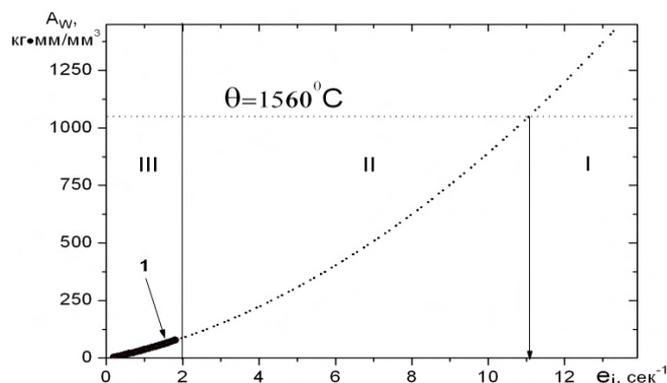


Рис. 14. Экстраполяция экспериментально установленной зависимости (1) удельной работы от скорости деформации [6]

Учитывая сложность физических связей между скоростью, степенью деформации и касательным напряжением обычно используют эмпирическую закономерность [7]

$$\sigma_{\text{спл}} = k \dot{\epsilon}_i^m \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{спл}}$ – напряжение текучести в состоянии сверхпластичности; k – некоторый коэффициент; $\dot{\epsilon}_i$ – скорость деформации; m – коэффициент упрочнения при сверхпластической деформации (при $m \geq 0,3$ металл пластичный, при $m < 0,8$ вязкий, а при $m < 0,3$ сверхпластичный).

Выполненные оценки (соотношение (3)) дают значения температур, близкие к температуре плавления обрабатываемого металла (рис. 14), несмотря на то что по данным [7] явление сверхпластичности в металлах наблюдается при температуре $(0,5-0,6)\theta_{\text{пл}}$.

Таким образом, в работе представлены физическая модель направленного разрушения металлов резанием и экспериментальные данные, подтверждающие справедливость этой модели.

Представленная физическая модель позволяет оценить эффективность направленного разрушения металлов (коэффициент полезного действия), ее зависимость от режимов резания, геометрии инструмента, типов обрабатываемых и инструментальных материалов, окружающей среды и т.д. Эти вопросы рассмотрим в последующих работах.

Запропонована фізична модель направленного руйнування металів різанням. Оцінені швидкість деформації металу і температура, що розвиваються в зоні руйнування.

Ключові слова: *направлене руйнування, швидкість деформації, різання металів, стружка.*

Physical model of directed destruction metal by cutting are proposed. Strain rate and temperature of the metal, developing in the failure zone are estimated.

Key words: *the directed destruction, speed of deformation, cutting of metals, shaving.*

Литература

1. Исследование вязкости металлов при высокоскоростных соударениях С. К. Годунов, А. А. Дерibas, И. Д. Захаренко, В. И. Мали //Физика горения и взрыва.– 1971.– Т. 7.– № 1.– С. 135–142.
2. Покровский Г.И. Гидродинамика высоких скоростей. – М.: Знание, 1966. – 48 с.
3. Куфарев Г. Л., Окенов К. Б., Говорухин В. А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. – Фрунзе: Мектеп, 1970. – 170 с.
4. Патент РФ №2327549. Режущая многогранная сменная пластина. / В. С. Матвеев, К. В. Баннов, А. В. Градобоев и др. Оpubл. 27.06.08, Бюл. № 18.
5. Могилев В. К., Лев О. И. Справочник литейщика: Справочник для профессионального обучения рабочих на производстве.– М.: Машиностроение, 1988.– 272 с.