

В. С. Кушнер, д-р техн. наук, Омск, Россия,
 М. Г. Сторчак, д-р техн. наук, Штуттгарт, Германия,
 В. А. Горелов, д-р техн. наук, Омск, Россия

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕЗАНИИ

The changes of the mechanical properties of the materials during cutting were investigated. It was shown that it is reasonable to use the maximal yield strength of a material to characterise the mechanical properties. It is reached by equal strengthening and softening during deformation under adiabatic behaviour.

1. Введение

Определение действительных механических свойств деформируемого материала, выбор моделей сопротивления материалов пластической деформации, введение дополнительных гипотез и предположений о свойствах и физической природе деформируемой среды относятся к основным проблемам физики, связанным со схематизацией задач механики сплошной среды. Это в полной мере относится и к резанию металлов.

Известны попытки распространить определяемые в статических испытаниях на растяжение или сжатие характеристики механических свойств материалов и на условия резания металлов [1, 2]. В качестве характеристик сопротивления материалов при резании предлагалось использовать и непосредственно средние удельные касательные силы (средние касательные напряжения) в зоне стружкообразования τ_y и на передней поверхности режущего лезвия q_F [3, 4]. При этом считалось, что касательные напряжения τ_y и q_F зависят только от прочностных характеристик при растяжении и не зависят от прочих условий резания. Альтернативное мнение состояло в том, что касательные напряжения τ_y и q_F не постоянны и не могут считаться характеристиками механических свойств материалов при резании [5, 6].

Актуальность решения проблемы определения действительных механических свойств материалов для условий резания возросла в связи с необходимостью разработки теоретических методов расчета температур, сил резания с целью использования результатов расчета для обоснования рациональных режимов резания, геометрических параметров инструментов, автоматизации проектирования и оптимизации технологических процессов обработки резанием.

2. Анализ основных гипотез о сопротивлении обрабатываемых материалов резанию, не учитывавших влияние температуры

Методы определения средних касательных напряжений при резании разрабатывались чаще всего в связи теоретическим расчетом сил резания

[1, 2]. А. М. Розенберг для расчета напряжений τ_y в условной плоскости сдвига использовал гипотезу о равенстве удельных работ деформации при резании и при сжатии [2]:

$$\tau_y = \frac{\sigma_s}{m \varepsilon_u} \left[\exp \left(\frac{m \varepsilon_u}{1,5} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

Н. Н. Зорев [1] сопоставлял предел текучести на сдвиг при растяжении и средние касательные напряжения τ_y в условной плоскости сдвига при резании, используя закон простого нагружения:

$$\tau_y = A \varepsilon_u^m, \quad (2)$$

где τ_s - предел текучести на сдвиг при растяжении, ε_u - истинный сдвиг.

Однако в опытах Н.Н.Зорева [1] по резанию различных сталей вопреки уравнению (2) средние касательные напряжения τ_y в условной плоскости сдвига с увеличением конечного истинного сдвига в зоне стружкообразования не возрастали, а либо оставались постоянными, либо уменьшались при увеличении истинного сдвига (рис. 1).

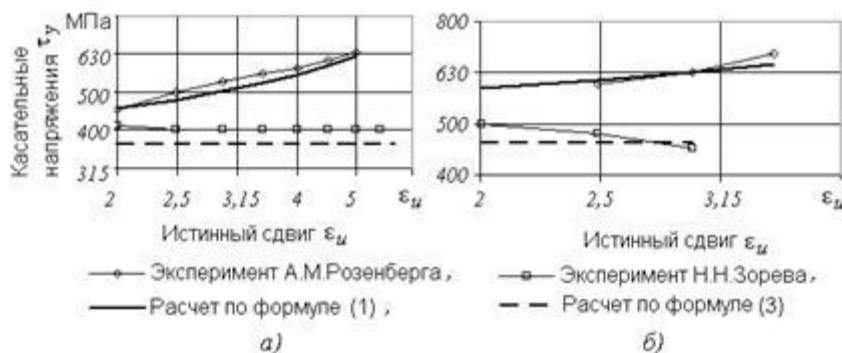


Рис. 1 – Влияние деформации ε_u на касательные напряжения τ_y при точении стали 10 (а) ($\sigma_s = 564 \text{ МПа}$, $m = 0,28$ [2], $\sigma_s = 380 \text{ МПа}$, $\delta = 34\%$ [1]) и стали 30 (б) ($\sigma_s = 700 \text{ МПа}$, $m = 0,22$ [2], $\sigma_s = 570 \text{ МПа}$, $\delta = 25\%$ [1])

На этом основании в работе [1] было принято допущение о независимости касательных напряжений $\tau_{\text{ж}}$ при резании от деформации $\varepsilon_{\text{ж}}$. Сопоставляя зависимость $\tau_{\text{ж}}(\varepsilon_{\text{ж}})$, полученную при растяжении, с результатами опытов по резанию, Н. Н. Зорев [1] пришел к выводу о возможности оценки величины $\tau_{\text{ж}}$ путем экстраполяции зависимости $\tau_{\text{ж}}(\varepsilon_{\text{ж}})$ на величину истинного сдвига $\varepsilon_{\text{ж}} = 2,5$:

$$\tau_{\text{ж}} = A_{2,5} = A(2,5)^m \quad (3)$$

Несмотря на сходство гипотез, использовавшихся в работах [1, 2] для расчета напряжений $\tau_{\text{ж}}$, полученные экспериментальные и теоретические результаты определения касательных напряжений $\tau_{\text{ж}}$ в условной плоскости сдвига для одинаковых условий резания существенно различались (рис. 1).

Большое распространение получили эмпирические соотношения, связывающие напряжения $\tau_{\text{ж}}$ только с прочностными характеристиками материала при растяжении [1,5]:

$$\tau_{\text{ж}} = \frac{0,6\sigma_{\text{ж}}}{1-1,7\psi_{\text{ж}}}, \quad \tau_{\text{ж}} \approx (0,8-1,0)\sigma_{\text{ж}}, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{ж}} \approx 0,8 S_{\text{ж}}, \quad (5)$$

В работе [3] постоянство касательных напряжений в зоне стружкообразования обосновывалось тем обстоятельством, что при резании конструкционных сталей относительно небольшой твердости температуры в зоне стружкообразования также были невысокими (около 300 °С) и не могли существенно повлиять на предел текучести деформируемого материала. Однако наряду со стационарными зависимостями напряжения $\tau_{\text{ж}}$ от деформации $\varepsilon_{\text{ж}}$ наблюдались и убывающие зависимости. Гипотеза о постоянстве касательных напряжений $\tau_{\text{ж}}$ в зоне стружкообразования при резании, использовавшаяся многими исследователями [3], опровергается убывающими зависимостями $\tau_{\text{ж}}(\varepsilon_{\text{ж}})$, которые были получены для мало упрочняемых сталей.

В работе [4] гипотеза о постоянстве касательных напряжений в зоне стружкообразования распространена и на участок пластического контакта на передней поверхности. Считалось, что кратковременный нагрев материала в процессе резания до высокой температуры (например, до 1000 - 1200 °С для сталей) не изменяет механических свойств обрабатываемого материала. Они остаются такими же, как и при комнатной температуре. На этом основании средние касательные напряжения $q_{\text{ж}}$ на передней поверхности принимались пропорциональными действительному пределу прочности при растяжении $S_{\text{ж}}$ [3, 4, 5]:

$$q_{\text{ж}} = 0,6 S_{\text{ж}}, \quad q_{\text{ж}} = 0,28 S_{\text{ж}}, \quad (6)$$

а отношение $q_{\text{ж}}/\tau_{\text{ж}}$ принималось постоянным для любых условий резания:

$$q_{\text{ж}} \approx \tau_{\text{ж}}, \quad q_{\text{ж}} \approx 0,5 \tau_{\text{ж}}. \quad (7)$$

3. О влиянии температуры на касательные напряжения при резании

Согласно существующим представлениям температура деформации оказывает сложное влияние на предел текучести. При повышении температуры предел текучести деформируемого материала уменьшается, причем зависимости предела текучести (или предела прочности) от температуры могут быть различными для различных сплавов. Увеличение скорости деформации приводит к росту предела текучести, причем с повышением температуры влияние скорости деформации проявляется в большей степени. Определяющее уравнение, отражающее влияние деформации, скорости деформации и температуры, имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{k\Delta T} f(\Delta T) \quad (8)$$

Уравнение (6), полученное на основании теоретических исследований и на основании обобщения экспериментальных данных, указывает на весьма сложную связь между пределом текучести, деформацией, скоростью деформации и температурой.

Известны предположения о том, что влияния скорости деформации и температуры компенсируют друг друга. С этой целью применялся параметр Зенера-Холомона или температура, модифицированная скоростью деформации [5]:

$$T_{\text{ж}} = T \left(1 - K \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (9)$$

Однако имеющиеся экспериментальные данные, в частности, опыты Финни и Уолэка [5] (рис. 2) опровергают эту гипотезу.

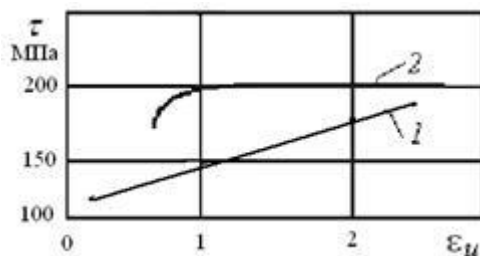


Рис. 2 – Влияние истинного сдвига на предел текучести на сдвиг при сжатии (кривая 1, скорость деформации $\approx 10^{-2} \text{ с}^{-1}$) и на касательное напряжение в условной плоскости сдвига при резании технически чистого алюминия (кривая 2, скорость деформации $\approx 10^3 - 10^4 \text{ с}^{-1}$)

Убывающие зависимости касательного напряжения τ_y от истинного сдвига ϵ_u , наблюдавшиеся в опытах Н. Н. Зорева [1], С. Спаанса, В. С. Кушнера [5] и др., являются доказательством влияния температуры, которая при адиабатических условиях деформации пропорциональна истинному сдвигу. Влияние температуры на предел текучести в различных областях зоны деформации имеет особенности, связанные со схематизацией зоны деформации.

4. Схематизация зоны деформации и ее влияние на предел текучести деформируемого материала

Зону пластических деформаций при резании принято разделять на зону стружкообразования (области А и А') и зону контактных пластических деформаций (области Б, В и Г) (рис.3). Целесообразность условного деления зоны стружкообразования на две области: широкую область относительно небольших деформаций А' и узкую область больших деформаций А, отмечалась в работе [3]. Здесь же на основании анализа корней стружки сделан вывод о прямолинейности конечной границы зоны стружкообразования.

Многие исследователи (Т.Н.Лоладзе, П.Б.Оксли, В.И.Садчиков, С.Спаанс, И.Л.Тэй Р.Ф.Скраттон и др.[5]), пренебрегая областью малых деформаций А', ограничивали зону стружкообразования параллельными границами.

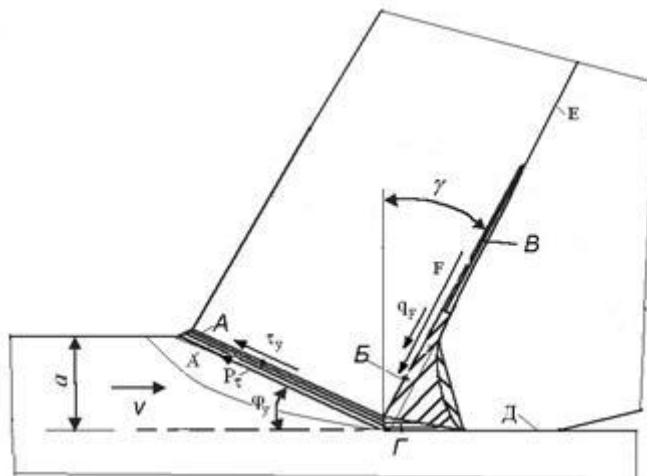


Рис.3 – Схема зоны деформации в плоскости стружкообразования при образовании сливной стружки: А – область больших деформаций зоны стружкообразования, А' – область малых деформаций зоны стружкообразования, Б – застойная зона на передней поверхности (область деформаций, не превышающих конечных деформаций зоны стружкообразования), Г – застойная зона на задней поверхности, В – участок больших пластических контактных деформаций на передней поверхности, Е- участок упругого контакта стружки с резцом, Д – зона упруго-пластического контакта на задней поверхности, F, F_x – касательные силы на передней поверхности и в условной плоскости сдвига, γ – угол наклона условной плоскости сдвига, а – толщина срезаемого слоя.

Наличие пластического участка контакта стружки с режущим лезвием отмечалось в работах [3, 4 и др.]. В работе [1] было выявлено существование застойной зоны на передней поверхности в области, прилегающей к режущей кромке. Часть этой застойной зоны, расположенная вблизи линии срезаемого слоя непосредственно перед фаской износа задней поверхности, рассматривается как застойная зона Г.

В работе [5] показано, что в узкой зоне стружкообразования изменение предела текучести не может быть существенным. В такой зоне деформируемый материал имеет свойства идеально пластического тела. Очевидно, справедливо и обратное: локализация деформации в узкой области осуществляется при выравнивании интенсивностей упрочнения и разупрочнения материала. Таким образом, рассмотрение широкой области А' первоначальных деформаций важно для оценки упрочнения деформируемого материала, в то время как конечный истинный сдвиг через удельную работу и температуру деформации влияет на уровень стабилизации предела текучести в узкой зоне стружкообразования А, рис. 4.

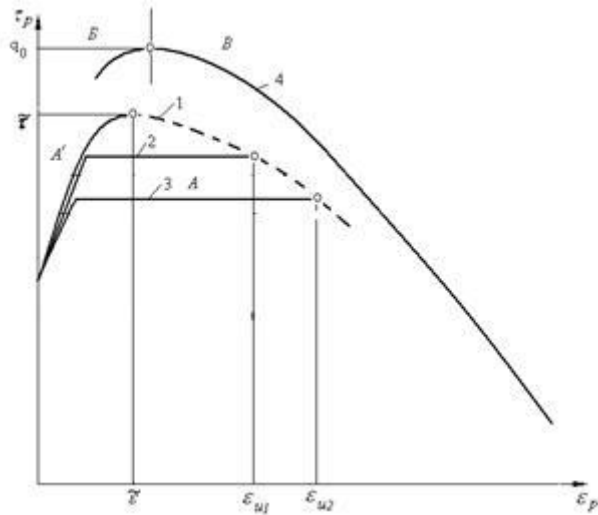


Рис. 4 – Зависимости предела текучести от текущего истинного сдвига в зоне стружкообразования (кривые 1, 2, 3) и на передней поверхности (кривая 4)

Описанная схема объясняет убывающие зависимости $\tau_F(\epsilon_p)$, полученные различными исследователями для ряда обрабатываемых материалов.

В отличие от зоны стружкообразования более высокие температуры на участке В на передней поверхности не могут оказывать влияние на предел текучести в застойной области Б. Поэтому зависимость предела текучести от истинного сдвига должна иметь вид кривой с максимумом (см. рис. 4).

Максимумы предела текучести, достигаемые в зоне стружкообразования или на участке застойной зоны на передней поверхности целесообразно использовать в качестве характеристик механических свойств материала при резании.

Имеются достаточные основания считать, что эти максимальные значения предела текучести должны быть несколько различными. Это связано с тем, что при одинаковых сдвиговых деформациях ϵ_p неоднородность распределения деформаций в зоне стружкообразования больше, чем в застойной зоне В. Вследствие этого средняя температура деформации в зоне стружкообразования будет меньше, чем в застойной зоне. При этом согласно уравнению (6) коэффициент динамичности для зоны В должен быть выше, чем для зоны АФ. Следовательно, максимальное значение предела текучести q_1 в зоне В должно быть больше, чем максимальный предел текучести $\tilde{q}$ в зоне стружкообразования.

Более высокие значения предела текучести на передней поверхности в области Б, чем в зоне стружкообразования, согласуются с явлением образования нароста на передней поверхности. Частицы, образующие нарост на передней поверхности, должны быть тверже материала стружки, получившего деформацию в зоне стружкообразования.

Еще одна особенность упрочнения материала при резании заключается в том, что максимальное значение предела текучести в застойных областях Б и Г в действительности имеет место, хотя и на очень малом участке, в то время как в зоне стружкообразования наибольшее значение предела текучести может быть меньше теоретически рассчитанного $\tilde{q}$ (рис.4).

Влияние температуры на предел текучести на участке В должно сказываться на величине среднего касательного напряжения q_F , в то время как максимальный предел текучести q_1 не зависит от температуры.

5. Экспериментальные доказательства изменения касательных напряжений q_F и отношения q_F/τ_F

Известные опыты А. М. Розенберга и Л. А. Хворостухина [2], о соотношении между отношением касательных сил F/P_F и усадкой стружки Z с использованием формулы Н.Г.Абуладзе для определения длины контакта стружки с резцом могут быть представлены и в виде зависимости усадки стружки от отношения средних касательных напряжений q_F/τ_F (рис. 5):

$$\frac{q_F}{\tau_F} = \frac{F/P_F}{(c/a)\sin\varphi_F}, \quad (10)$$

$$\frac{c}{a} = \zeta^{0.1} \left[\zeta (1 - \operatorname{tg}\gamma) + \frac{1}{\cos\gamma} \right], \quad \varphi_F = \operatorname{arctg} \frac{\cos\gamma}{\zeta - \sin\gamma}$$

где

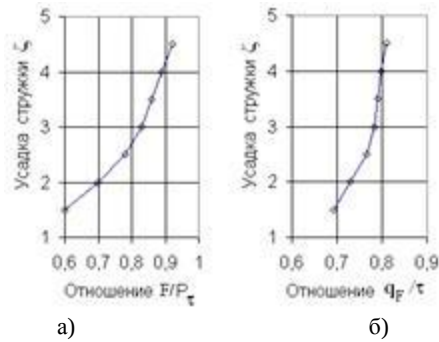


Рис. 5 – Зависимости усадки стружки Z от отношения $F/P\tau$ касательных сил и от отношения q_F/τ_y по экспериментальным данным А.М.Розенберга при точении сталей резцом Т15К6 ($q=0$, $t=3$ мм, $S=0,291$ мм/об)

Из рис. 5 (б) следует, что отношение q_F/τ_y не остается постоянным.

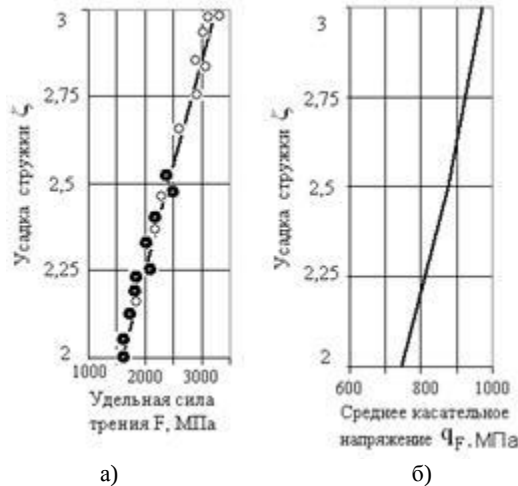


Рис. 6 – Зависимости усадки стружки от удельной силы трения F (рис. 7, а) и от среднего касательного напряжения q_F (рис. 7, б) при точении стали 35 по данным М.И.Клушина и М.Б.Гордона [2]

Изменение среднего касательного напряжения q_F следует также из результатов обработки известных экспериментальных данных М.И.Клушина и М. Б. Гордона [2], полученных при точении стали 35 (рис. 6).

Такой же вывод следует из обработки экспериментальных данных Н. Н. Зорева о силах резания и усадке стружки при точении стали 35Х3МН (рис. 7).

$$\frac{q_F}{\tau_y} = \frac{\cos \gamma \cdot \frac{P_y}{P_x} + \sin \gamma}{\frac{c}{a} \sin \varphi_y \left(\cos \varphi_y - \frac{P_y}{P_x} \sin \varphi_y \right)} \quad (11)$$

Таким образом, уменьшение отношения q_F/τ_y вызывает уменьшение усадки стружки. В то же время известно [1, 2, 3], что уменьшение усадки стружки наблюдается при увеличении температуры передней поверхности.

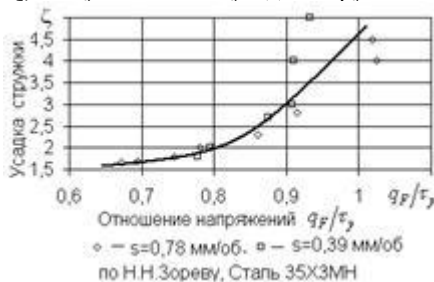


Рис. 7 – Зависимость усадки стружки Z от отношения касательных напряжений q_F/τ_y по результатам обработки экспериментальных данных Н.Н.Зорева [1] о силах резания и усадке стружки

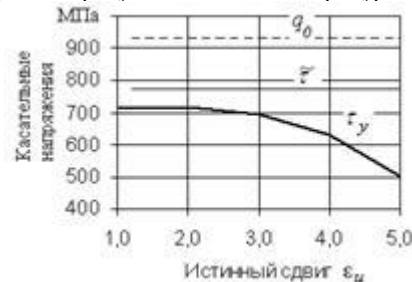


Рис. 8 – Влияние истинного сдвига на среднее касательное напряжение в условной плоскости сдвига по результатам расчета для стали $S_b = 950$ МПа, $m = 0,15$, зависимость предела прочности от температуры деформации аппроксимировалась экспонентой.

Из этого следует, что именно увеличение температуры передней поверхности вызывает уменьшение предела текучести на передней поверхности, которое в свою очередь для сохранения равновесия сил в зоне стружкообразования и на передней поверхности приводит к уменьшению усадки стружки.

На основании вышеизложенных фактов касательные напряжения в зоне стружкообразования и температура деформации, а также касательные напряжения и температуры на передней поверхности необходимо рассчитывать с учетом их взаимовлияния, т.е. на основе термомеханического подхода.

Первая задача может быть решена при допущении об адиабатичности процесса деформации в зонах АФ, Б и Г (см. рис. 3). При этом температура деформации определяется простым соотношением

$$\Delta T' = \frac{A_{\text{в}}}{C_v}, \quad \text{где} \quad A_{\text{в}} = \frac{1}{T_{\text{в}}} \int_0^{z_p} \tau_p d\varepsilon \quad (12)$$

Зависимость предела текучести от деформации следует определять интегрированием уравнения (8) с учетом (12) и с учетом действительных зависимостей предела прочности материала от температуры. Максимальные значения предела текучести в зоне стружкообразования и на передней поверхности не зависят от конечного истинного сдвига, тогда как среднее касательное напряжение в зоне стружкообразования в общем случае зависит от конечного истинного сдвига (рис. 8).

При этом расчетные результаты лучше согласуются с экспериментальными зависимостями [1], чем результаты, полученные по моделям (1) и (3).

Выводы.

Деформация оказывает на удельную работу и на предел текучести деформируемого материала не только непосредственное влияние, как упрочняющий фактор, но и косвенное разупрочняющее влияние через изменение температуры деформации, а также косвенное упрочняющее влияние через изменение коэффициента динамичности (через температурно-скоростной фактор).

Использование удельной работы деформации в качестве зависимой переменной в определяющем уравнении при адиабатических условиях деформации позволяет исключить из этого уравнения такие факторы как температура деформации и предел текучести и получить путем интегрирования этого уравнения зависимости удельной работы от деформации в явном виде.

Максимальные значения предела текучести в зоне стружкообразования и на передней поверхности достигаются при выравнивании интенсивностей упрочнения и разупрочнения деформируемого материала.

Локализация деформаций в узкой области вызывает стабилизацию предела текучести на уровне, соответствующем конечной температуре деформации, меньшем, чем максимальное значение предела текучести, определенное из условия выравнивания интенсивностей упрочнения и разупрочнения.

То, что максимальные значения предела текучести на передней поверхности $\sigma_{\text{в}}$ и в зоне стружкообразования $\sigma_{\text{с}}$ в отличие от средних напряжений $\bar{\sigma}$ не зависят от конечного истинного сдвига $\varepsilon_{\text{в}}$ (и прочих условий резания), свидетельствует о целесообразности использования их в качестве действительных механических характеристик обрабатываемого материала при резании.

Максимальные касательные напряжения на передней поверхности превышают напряжения в условной плоскости сдвига.

Список литературы: 1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. –М.: Машгиз, 1956, 368 с. 2. Розенберг А.М., Еремин А.Н., Элементы теории процесса резания металлов.-М.:Машгиз, 1956, 319 с. 3. Развитие науки о резании металлов. Колл. авт. – М.: Машиностроение, 1967. – 420 с. 4. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента –М.:Машиностроение, 1969, 148 с. 5. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных металлов. Иркутск. Изд-во Иркутского университета, 1982. 180 с. 6. Спаанс. С. О линиях течения, распределении напряжений, деформации и скорости деформации и об устойчивости в первичной зоне сдвига при резании металлов.- Конструирование и технология машиностроения, (Trans. of ASME) 1962, №2, 204 с. 7. Васин С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании/ С.А.Васин, А.С.Верещака, В.С.Кушнер.: Учеб. для техн. вузов. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001.-448 с.: ил.

Поступила в редколлегию 15.06.2009