

УДК 539.374

ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ СТРУЖКИ СКАЛЫВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

А. М. Коврижных

Новосибирский военный институт Министерства обороны Российской Федерации,
630117 Новосибирск
E-mail: akovr@sibmail.ru

Предлагается жесткопластическая модель образования стружки скалывания, основанная на критерии текучести Кулона — Мора и позволяющая определять размеры скалываемых элементов при ортогональном резании пластичных и хрупких металлов.

Ключевые слова: резание металлов, стружка скалывания, пластичность, критерий текучести Кулона — Мора.

Анализ основных теорий резания металлов [1–6] показывает, что все они дают плохое совпадение теоретических расчетов с результатами экспериментов, за исключением некоторых частных случаев, лежащих в узком диапазоне условий резания. Вместе с тем все теории резания металлов имеют то достоинство, что они углубляют понимание механизма резания, облегчая тем самым поиск эффективных методов исследования и новых решений задач механики резания материалов.

В данной работе строится механическая модель, основанная на простых инженерных формулах, для определения размеров скалываемых элементов и силы сопротивления резанию металла. Скалывание элемента стружки происходит по плоскости, которая с направлением движения резца составляет угол Φ — угол скалывания (рис. 1). В дальнейшем рассматривается ортогональное резание, при котором резец, имеющий форму двугранного клина, перемещается под прямым углом к режущей кромке. Передний угол резца, образуемый рабочей гранью клина с вертикальным направлением (рис. 1), обозначим α . Стружка $OABC$, заключенная между передней гранью клина и плоскостью скола, под действием

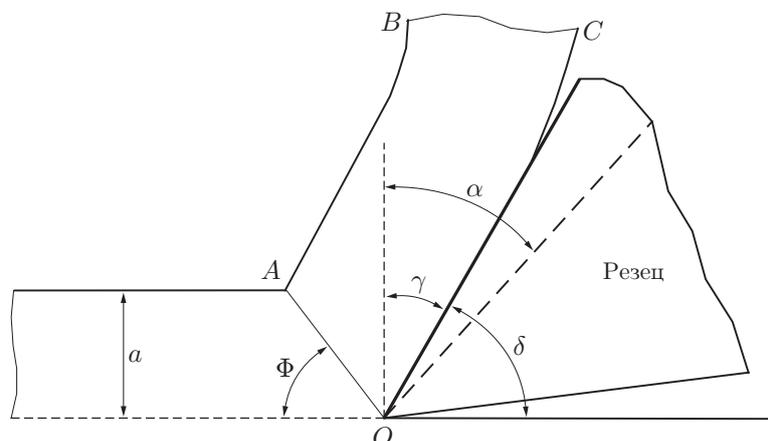


Рис. 1. Модель ортогонального резания с плоскостью скола OA

результатирующей силы P со стороны клина поднимается по плоскости скола OA , преодолевая силы сцепления. Предположим, что трение на площади контакта между резцом и стружкой с достаточной степенью точности определяется средним углом трения β .

Так как равнодействующая всех сил P со стороны рабочей грани клина на стружку при наличии трения составляет угол β с направлением нормали к этой грани, то данная задача будет эквивалентна задаче, в которой передняя грань клина является идеально гладкой, а передний угол резца $\gamma = \alpha - \beta$. Аналогичная идея применялась в [7] при решении задач о внедрении клинообразных штампов с образованием жесткого нароста. Отметим, что переход к эквивалентной задаче значительно упрощает поиск новых жесткопластических решений и характеристик поля напряжений в стружке на поверхности ее контакта с резцом, так как в этом случае главные оси напряжений легко определяются. Действительно, поскольку в эквивалентной задаче клин является гладким, касательные напряжения в стружке на линии контакта с резцом будут равны нулю, а значит, главные оси напряжений будут совпадать с направлениями касательной и нормалью к передней грани клина.

Таким образом, в рассматриваемой задаче заданными являются: α — передний угол резца, β — угол трения и глубина a , на которую металл обрабатывается резанием (см. рис. 1). Ширина резца обычно значительно больше глубины a , поэтому деформацию, по существу, можно считать плоской.

В зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала, режима резания, геометрии режущего инструмента и применяемых смазочно-охлаждающих веществ в процессе резания образуется стружка скалывания, сливная или элементная [2, 3].

При обработке хрупких и пластичных материалов на очень низких скоростях резания и высоких скоростях подачи образуется элементная стружка. В этом случае в зоне деформации происходит скол и стружка разбивается на отдельные элементы [2, 3].

При обработке сталей и большинства других вязких материалов на относительно невысоких скоростях резания, когда удаляется слой значительной толщины инструментами с относительно небольшими передними углами, образуется стружка скалывания, состоящая из отдельных, явно различимых элементов, сохраняющих между собой связь. При уменьшении толщины среза, увеличении скорости резания и увеличении переднего угла инструмента образуется сливная стружка. Наоборот, при увеличении толщины среза, уменьшении скорости резания и переднего угла процесс стружкообразования сопровождается отрывом элементов стружки от заготовки [3].

При резании хрупких металлов, например чугунов, на определенных скоростях резания инструментами, имеющими небольшие передние углы, при незначительной толщине среза процесс стружкообразования может происходить так же, как и при обработке пластичных металлов.

Вышеприведенный анализ процесса стружкообразования является убедительным обоснованием того, что для исследования процессов резания следует применять условия пластичности, в которых учитывается хрупкость металла [8, 9]. В качестве такого условия примем критерий Кулона — Мора, в котором это свойство учитывается с помощью угла внутреннего трения:

$$\max_n |\tau_n| + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi = C, \quad (1)$$

где τ_n , σ_n — касательное и нормальное напряжения на предельной плоскости; φ — угол внутреннего трения; C — сцепление. В (1) сжимающие напряжения считаются отрицательными, а растягивающие — положительными.

Жесткопластический анализ процесса резания базируется на предположении существования единственной плоскости сдвига (изолированной линии скольжения), на которой

выполняется условие текучести Кулона — Мора. Проведем анализ сил, действующих на стружку со стороны поверхности ее контакта с резцом и со стороны линии скола. В дальнейшем все силы будем относить к ширине среза b . Элементы этого анализа рассматриваются в [1–6]. Результирующую сил реакций R , действующих по линии скола OA со стороны заготовки на стружку $OABC$, представим в виде суммы нормальной R_n и касательной R_t составляющих, которые могут быть определены через нормальное и касательное напряжения σ_n , τ_n и сцепление C :

$$R_t = \tau_n l, \quad R_n = \sigma_n l, \quad R_c = Cl, \quad (2)$$

где $l = OA$ — длина линии скола; R_c — сила сцепления, действующая по линии скола на единицу ширины среза b . Используя (1) и (2), найдем $R_t = -R_n \operatorname{tg} \varphi + R_c$. Записывая уравнения равновесия в проекциях на оси n и t , получим

$$R_t = P \cos(\Phi - \gamma), \quad R_n = -P \sin(\Phi - \gamma), \quad P = \frac{Ca \cos \varphi}{\sin \Phi \cos(\Phi - \gamma + \varphi)}. \quad (3)$$

Как видно из (3), величина равнодействующей сил давления на стружку со стороны рабочей поверхности резца зависит от ориентации плоскости скола, характеризуемой углом Φ , т. е. $P = P(\Phi)$. Приравнивая к нулю производную этой функции, найдем Φ [1]:

$$\Phi = \pi/4 + (\alpha - \beta - \varphi)/2 = \pi/2 - (\delta + \varphi)/2,$$

при котором сила резания достигает минимума $P = P_\Phi$:

$$P_\Phi = \frac{2Ca \cos \varphi}{1 - \sin(\beta - \alpha)} = \frac{Ca \cos \varphi}{\cos^2(\delta/2 + \varphi/2)}, \quad (4)$$

где $\delta = \pi/2 - \gamma = \pi/2 - \alpha + \beta$ — угол резания эквивалентного клина с идеально гладкой передней гранью. Далее, используя формулы (2), (3) и то, что

$$\Phi - \gamma = \pi/4 + (\beta - \alpha - \varphi)/2 = (\delta - \varphi)/2,$$

определим касательное и нормальное напряжения на линии скола:

$$\tau_n = C \cos \varphi \frac{\cos((\delta - \varphi)/2)}{\cos((\delta + \varphi)/2)}, \quad \sigma_n = -C \cos \varphi \frac{\sin((\delta - \varphi)/2)}{\cos((\delta + \varphi)/2)}.$$

Как отмечалось выше, процесс образования металлической стружки состоит из ряда повторяющихся процессов со скалыванием элементов определенных размеров. При этом сила резания представляет собой периодическую функцию. Увеличение этой силы продолжается до тех пор, пока пластическая область не распространится на всю толщину срезаемого слоя между передней гранью клина и свободной поверхностью заготовки. Другими словами, сила резания P достигает максимальных значений с началом появления плоскости скалывания, а затем уменьшается до минимального значения. Таким образом, сила сопротивления металла при резании плоским клином совершает колебания с некоторыми амплитудой и частотой. Частота колебаний силы сопротивления v/s зависит от поступательной скорости v движения клина и длины s скалываемого участка. За длину скалываемого участка s примем путь, на который продвигается клин за одно скалывание элемента стружки. Расстояние между линиями скола d (толщина скалываемого элемента) выражается через длину скалываемого участка s (рис. 2) по формуле $d = s \sin \Phi$.

После образования плоскости скола сила резания P уменьшится до минимального значения. Дальнейшее продвижение клина на расстояние $s = OK$ вновь приведет к увеличению силы резания до предельного значения (4) и к образованию новой плоскости сдвига OA (рис. 2).

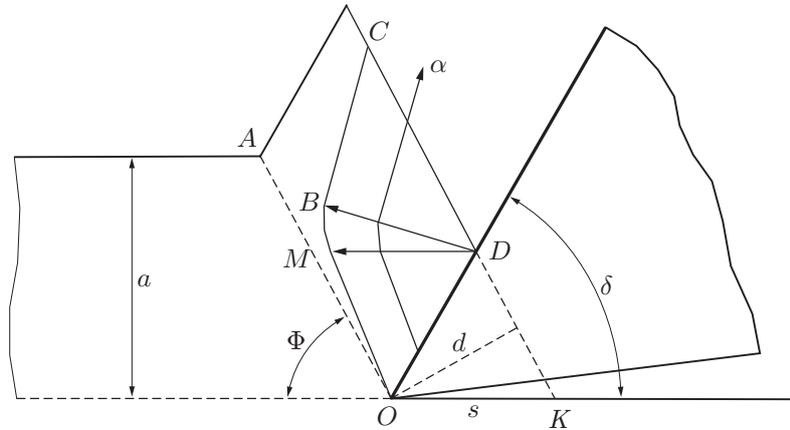


Рис. 2. Жесткопластическая модель образования элемента скола при резании металла

Выберем систему координат n, t следующим образом: направление оси t совпадает с направлением передней грани клина, а ось n перпендикулярна к ней. Сформулируем граничные условия для рассматриваемой задачи. На отрезке OD со стороны клина на металлическую стружку действует давление q . Так как в эквивалентной задаче клин с передним углом $\gamma = \alpha - \beta$ является идеально гладким, то на OD имеем: $\sigma_n = -q$, $\tau_{nt} = 0$.

При формулировании граничных условий на DC выберем систему координат n, t таким образом, что ось t направлена по DC , а ось n ортогональна к ней. Если при образовании плоскости скола образуется свободная поверхность, т. е. между элементами скола нет прочностной связи, то на DC имеем: $\sigma_n = 0$, $\tau_{nt} = 0$. Используя эти граничные условия и выражения для предельных напряжений σ_n и σ_t в пластическом состоянии на DC , получим

$$\sigma_n = 0, \quad \sigma = -C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \sigma_t = -2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Такой характер образования стружки скалывания, когда срезаемый слой материала разделяется линиями скола на отдельные элементы, наблюдается при резании хрупких металлов. В случае, когда отдельные элементы стружки скалывания сохраняют между собой прочностную связь, предельные напряжения на DC можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= -(m - 1)C \cos \varphi, & \sigma_t &= -\left(m \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 1\right)C \cos \varphi, \\ \sigma &= -mC \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, & \tau_{nt} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Если в этих соотношениях принять $m = 1$, то получим на DC свободную поверхность. При $m > 1$ все напряжения в (5) будут сжимающими, что, по-видимому, соответствует образованию сливной стружки. Можно предположить, что случай $0 \leq m \leq 1$ соответствует образованию стружки скалывания, когда между элементами скола сохраняется связь. Например, при $m = 0$ на DC имеем $\sigma_n = -\sigma_t > 0$, что соответствует сдвигу в направлении действия максимального касательного напряжения.

Решим рассматриваемую задачу методом характеристик сначала для пластичных металлов, когда $\varphi = 0$. Предположим, что область пластических деформаций $OMBVD$ состоит из трех областей: равномерных полей напряжений OMD , BVD и центрированного поля линий скольжения MVD (рис. 2). Если среднее нормальное напряжение обозначить σ ,

а угол, который составляет α -линия скольжения с осью n (нормаль к передней грани клина, см. рис. 2), — θ , то вдоль α -линии будем иметь следующее соотношение:

$$\sigma - 2C\theta = \text{const}.$$

Используя граничные условия на OD и DC , получим

$$\sigma - 2C\pi/4 = -m\sigma - 2C(\pi/4 + \delta/2).$$

Так как $\sigma = -q + C$, то имеем: $q = C(m + 1 + \delta)$. Результирующая нагрузка P_d со стороны передней грани резца определяется по формуле

$$P_d = qOD = C(m + 1 + \delta)d / \cos(\delta/2). \quad (6)$$

Образование линии скола OA происходит следующим образом. После сдвига по линии DC резец под действием силы P_d начинает срезать следующий элемент скола, преодолевая сопротивление обрабатываемого материала пластическому деформированию. По мере проникновения резца в деталь площадь контакта, характеризуемая отрезком $l_* = OD$, увеличивается, что обуславливает увеличение силы P_d . Площадь контакта пропорциональна длине отрезка l_* , а при постоянном угле резания клина δ — расстоянию между линиями скола $d = l_* \cos(\delta/2)$.

Как видно из рис. 2, при перемещении клина расстояние d между линией скола CD и параллельной ей линией OA , проходящей через вершину движущегося клина, постоянно увеличивается, но тогда из формулы (6) следует, что растет нагрузка P_d . Так происходит до того момента, пока P_d не достигнет величины, равной силе резания P_Φ , определяемой по формуле (4). Таким образом, условие образования новой линии скола $P_d = P_\Phi$ позволяет определить d :

$$d = \frac{a}{(m + 1 + \delta) \cos(\delta/2)}. \quad (7)$$

После того как предельная нагрузка P_d достигла значения P_Φ , вызывающего сдвиг по плоскости скола OA , дальнейшее пластическое деформирование по схеме, представленной на рис. 2, становится невозможным, так как в этом случае требуется увеличение силы резания. Но поскольку этой силы достаточно для образования плоскости скола, то произойдет сдвиг образовавшегося элемента стружки по плоскости, составляющей угол $\Phi = \pi/2 - (\delta + \varphi)/2$ с направлением скорости резания.

Из уравнения (7) найдем длину линии контакта l_* :

$$l_* = \frac{d}{\cos(\delta/2)} = \frac{a}{(m + 1 + \delta) \cos^2(\delta/2)}.$$

Длина линии скола l и отношение l/l_* для пластичных металлов определяются по формулам

$$l = a / \cos(\delta/2), \quad l/l_* = (m + 1 + \delta) \cos(\delta/2). \quad (8)$$

Рассмотрим теперь резание хрупких металлов, когда $\varphi > 0$. Обратимся к результатам работы [9], в которой решена задача с пластическими зонами, представленными на рис. 2. Запишем соотношение вдоль α -линии скольжения:

$$\text{ctg } \varphi \ln(1 - (\sigma/C) \text{tg } \varphi) + 2\theta = \text{const}.$$

Используя граничные условия на OD и DC в форме (5), получим

$$\text{ctg } \varphi \ln\left(1 - \frac{\sigma}{C} \text{tg } \varphi\right) + 2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = \text{ctg } \varphi \ln\left(\frac{1 + (m - 1) \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}\right) + 2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} + \frac{\delta - \varphi}{2}\right).$$

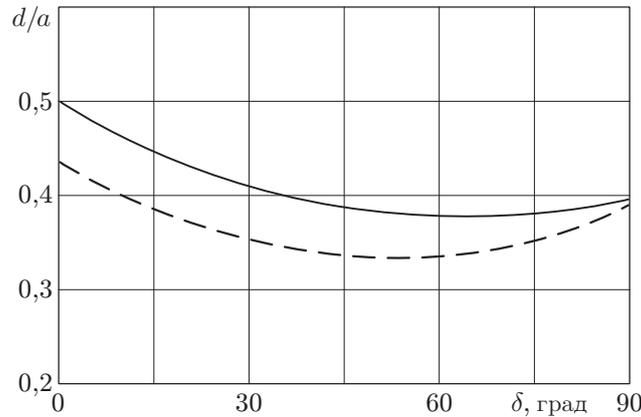


Рис. 3. Зависимость размера скальываемого элемента от угла резания для двух различных углов внутреннего трения φ : сплошная линия — $\varphi = 0$; штриховая линия — $\varphi = 20^\circ$

Решая это уравнение относительно σ , найдем

$$\sigma = C \operatorname{ctg} \varphi \left(1 - \frac{1 + (m - 1) \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\delta - \varphi) \operatorname{tg} \varphi} \right). \quad (9)$$

Далее, используя граничное условие на OD , определим

$$\sigma = -\frac{q}{1 + \sin \varphi} + \frac{C \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), найдем q и предельную нагрузку $P_d = q OD = qd / \cos(\delta/2 - \varphi/2)$. В результате получим

$$P_d = \frac{Cd \operatorname{ctg} \varphi}{\cos(\delta/2 - \varphi/2)} \left[(1 + \sin \varphi) \frac{1 + (m - 1) \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\delta - \varphi) \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right]. \quad (11)$$

Приравняв это значение силы P_d к силе резания P_Φ , определяемой из (4), найдем размер скальываемого элемента, т. е. его толщину d :

$$d = \frac{a \sin \varphi \cos(\delta/2 - \varphi/2)}{\cos^2(\delta/2 + \varphi/2) \left[(1 + \sin \varphi) \frac{1 + (m - 1) \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\delta - \varphi) \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right]}. \quad (12)$$

Полученная формула позволяет определить размер скальываемого элемента при известных физико-механических свойствах металла, толщине снимаемого слоя a и угле резания δ . На рис. 3 представлены зависимости относительного размера скальываемого элемента d/a от угла резания δ для двух различных углов внутреннего трения φ . Зная размер скальываемого элемента d , определим длину линии контакта l_* и длину линии скола l , которые определяются по формулам

$$l_* = d / \cos(\delta/2 - \varphi/2), \quad l = a / \cos(\delta/2 + \varphi/2).$$

Далее найдем отношение площади скола lb к площади контакта l_*b :

$$\frac{l}{l_*} = \frac{\cos(\delta/2 + \varphi/2)}{\sin \varphi} \left[(1 + \sin \varphi) \frac{1 + (m - 1) \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\delta - \varphi) \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right]. \quad (13)$$

Длина линии контакта передней грани резца со стружкой l_* , которая до сих пор отождествлялась с длиной линии смятия $l_0 = OD$, как для пластичных [2], так и для хрупких

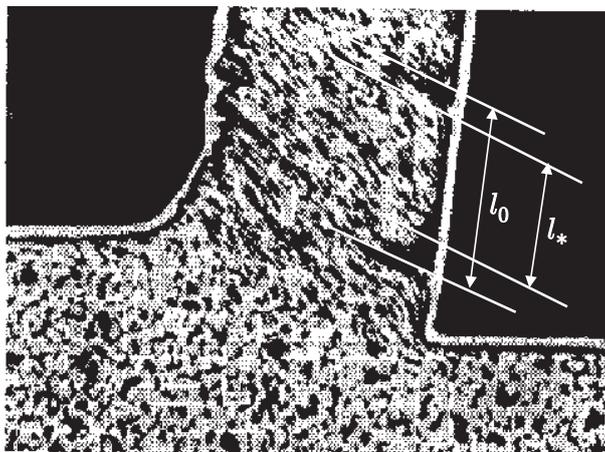


Рис. 4. Микрофотография сечения корня стружки, зафиксированного при резании стали 20X [2]

металлов [3] при образовании стружки скалывания удовлетворяет неравенству $l_* < l_0$. Измерение размеров l_0 элементов стружек [3], полученных при резании с низкими скоростями, показало, что для стали, железа и вязкой бронзы при угле резания в пределах $45\text{--}75^\circ$

$$l/l_0 = 1,5 \div 2,0, \quad (14)$$

для твердой бронзы и чугуна

$$l/l_0 = 2 \div 3. \quad (15)$$

Определим размеры скалываемых элементов по формулам (8) и (13) для пластичных и хрупких металлов. Как отмечалось выше, реальная площадь контакта элемента с резцом l_*b получается несколько меньше площади смятия l_0b , поэтому можно записать $l_* = \lambda l_0$, где $\lambda \leq 1$, что и наблюдается на приведенных в [2, 3] фотографиях для хрупких и пластичных металлов при образовании стружки скалывания. На рис. 4 приводится фотография сечения корня стружки, зафиксированного при свободном резании стали 20X ($\alpha = 10^\circ$, $b = 10$ мм, $v = 0,7$ м/мин) [2].

В дальнейших расчетах примем угол резания $\delta = 75^\circ$, что соответствует средним величинам этого угла в опытах с учетом трения стружки о резец [3]. Для стали, железа и вязкой бронзы $\varphi = 0$, а для твердой бронзы и чугуна $\varphi = 20^\circ$. Если в (8) принять $m = 1$, $\lambda = 0,75$, то получим $l/l_0 = 1,98$. Если в (13) принять $m = 1$, $\lambda = 0,75$, то найдем $l/l_0 = 2,8$. В каждом из этих случаев принималось, что элемент скола полностью отделился от стружки, т. е. $m = 1$. Аналогичные расчетные значения l/l_0 можно получить для элементов скола, которые сохраняют связь со стружкой ($m \neq 1$) и у которых площадь контакта совпадает с площадью смятия ($\lambda = 1$). Так как в действительности имеют место оба указанных факта, то можно утверждать, что расчеты по формулам (8) и (13) соответствуют результатам экспериментов как для пластичных (14), так и для хрупких металлов (15).

Таким образом, предложенная в работе жесткопластическая модель образования стружки скалывания позволяет определить по формуле (12) размер элемента скола, который зависит от глубины резания, угла внутреннего трения металла, переднего угла резца и среднего угла трения стружки по резцу. Получено удовлетворительное соответствие результатов расчета с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Merchant М. Е.** Mechanics of the metal cutting process // J. Appl. Phys. 1945. V. 16, N 6. P. 267–275.
2. **Зорев Н. Н.** Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956.
3. **Клушин М. И.** Резание металлов. М.: Машгиз, 1956.
4. **Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш.** Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969.
5. **Кабалдин Ю. Г., Олейников А. И., Шпилев А. М. и др.** Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием. Владивосток: Дальнаука, 2000.
6. **Егорова Ю. Г., Каверзина С. А., Хромов А. И.** Резание и разрушение идеальных жесткопластических тел // Докл. РАН. 2002. Т. 385, № 4. С. 490–493.
7. **Соколовский В. В.** Теория пластичности. М.: Высш. шк., 1969.
8. **Коврижных А. М.** Пластическое деформирование упрочняющихся материалов при сложном нагружении // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1986. № 4. С. 140–146.
9. **Коврижных А. М.** К вопросу охрупчивания металла при пластическом деформировании // ПМТФ. 1989. № 6. С. 161–168.

*Поступила в редакцию 1/VII 2004 г.,
в окончательном варианте — 28/X 2004 г.*
