

О некоторых механизмах предельного трения с разрушением

Гольдштейн Р.В.[†], Осипенко Н.М.

[†]goldst@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, пр. Вернадского 101(1), 119526 Москва

On the mechanisms of limit friction with fracture

R.V. Goldstein, N.M. Osipenko

A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Science,
Vernadskogo St. 101(1), 119526 Moscow

Построена модель процесса, приводящего к появлению элементов третьего тела при разрушении материала в области контакта сухого трения. Проанализирован вариант эволюции плоского элемента третьего тела в режиме интенсивного касательного воздействия на его контактных поверхностях. В зависимости от соотношения сил нормального давления и сдвига в области контакта отделившийся фрагмент в дальнейшем может образовать элемент качения, либо остаться плоским элементом скольжения. Получен критерий инициирования свертывания плоского элемента в элемент качения (в рамках плоской задачи).

Ключевые слова: сухое трение, разрушение, трещина, изгиб, сдвиг.

A model of the process leading to the formation of a third body elements in the process of fracture of material in a dry friction contact zone was suggested. A variant of evolution of a plane third body element was analyzed for the regime of intensive shear action on its contact surfaces. The separated fragment can form a rolling element or remain to be a plane slipping element depending on the relation between normal pressure force and shear force in the contact zone. A criterion for twisting a plane element into a rolling element was obtained (within the framework of the plane elasticity).

Keywords: dry friction, fracture, crack, bending, shift.

1. Введение

Одной из причин нестационарных явлений в области контакта тел при сухом трении является эффект уменьшения сопротивления движению при переходе от неподвижного контакта (сцепления) к проскальзыванию. Традиционно задача о контакте деформируемых тел с трением рассматривается без учета процессов разрушения их приповерхностных слоев. При этом характеристики контактного взаимодействия находятся после определения зон скольжения и сцепления в области контакта из решения соответствующей задачи теории упругости. Представляется, что в условиях силового контакта, сопровождающегося локальным разрушением контактирующих тел, изменение эффективных условий трения при сдвиге тел может быть связано с изменением структуры области контакта – появлением в ней продуктов разрушения или интенсивной деформации, облегчающих процесс движения.

Заметим, что положение границ, разделяющих зоны сцепления и проскальзывания в рамках всего рассматриваемого объема (во внешней задаче), может быть найдено из условия несингулярности напряжений на них. С энергетической точки зрения последнее эквивалентно условию обращения в нуль удельного приращения энергии деформации контактирующих тел при смещении положения границ зон скольжения и сцепления относительно равновесного ($\partial W / \partial S = 0$). В данной работе задача о контакте рассматривается в иной постановке. Будем считать, что в результате контактного взаимодействия, сопровождаемого разрушением приповерхностных слоев, формируется промежуточная прослойка, в которой относительное скольжение осуществляется через частицы появившиеся в результате контактного разрушения в приповерхностных слоях. О правомерности такой постановки задачи свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные [1-4]. Образование (выделение) таких частиц характерно для начальной фазы

контактного взаимодействия. Оно может продолжаться и в следующих фазах.

Будем придерживаться модели процесса, представленной ранее в [5] и опирающейся на следующие предположения:

1. толщина промежуточной прослойки (третьего тела) в области скольжения много меньше двух других ее характерных размеров;

2. инициирование разрушения - образование и развитие поверхностных трещин отрыва и/или сдвига, приводящих к отделению частиц или кусков материала, происходит вблизи подвижной границы зон скольжения и сцепления, где напряженное состояние обусловлено сменой граничных условий;

3. подвижно-равновесное состояние границы зон скольжения и сцепления определяется условием достижения величиной $(\partial W/\partial S)$ некоторого критического значения $(\partial W/\partial S)_{cr}$;

4. величина $(\partial W/\partial S)_{cr}$ зависит от конкретного механизма (сценария) разрушения, который реализуется в концевых областях зоны скольжения, и может быть определена, исходя из модели этих концевых областей (аналог внутренней задачи теории трещин [6]);

5. процессами в концевых областях управляют локальные характеристики напряженно-деформированного состояния (коэффициенты интенсивности напряжений), определяющиеся контактным взаимодействием в масштабе области контакта (аналог внешней задачи теории трещин [6]).

Поскольку контактному взаимодействию с трением и поверхностным разрушением присущи механизмы саморегуляции, формирование внутренней и внешней задач, а также взаимосвязь между ними оказываются сложнее, чем в теории трещин. В частности, может быть существенным влияние внутренней задачи на внешнюю.

Ниже в рамках сделанных предположений рассмотрены примеры описания наблюдаемых схем разрушения при трении. При этом проясняются высказанные соображения о внутренней и внешней задачах. Для простоты считается, что упругие свойства контактирующих тел одинаковы.

2. Иницирование промежуточного слоя

Рассмотрим один из типичных механизмов формирования промежуточной структурированной прослойки между двумя трущимися телами. Пусть два упругих тела, имеющих плоский шероховатый контакт, подвержены в точках, удаленных от области контакта, однородному взаимному сжатию (σ_∞) и сдвигу (τ_∞). Будем считать (см. рис. 1), что взаимодействие между телами в области проскальзывания осуществляется посредством перекачивания между ними структурных элементов промежуточного слоя, образующихся в результате разрушения приповерхностных слоев трущихся тел. Области обычного контакта между телами (области сцепления) соответствуют участкам, в которых еще не сформировался промежуточный слой.

Примем для определенности, что формирование структурных элементов происходит путем их выкалы-

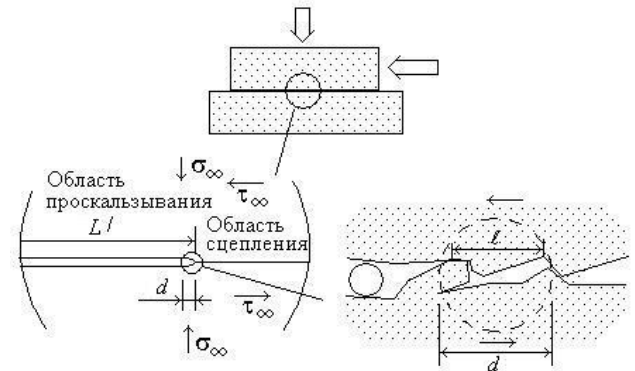


Рис. 1. Схема процесса разрушения на границе областей проскальзывания и сцепления.

вания посредством развития в окрестностях отдельных пар контактирующих бугорков исходных шероховатых тел трещин нормального разрыва, ориентированных вдоль нормали к поверхности. Возможны и другие механизмы, например, с привлечением эффектов фазовых переходов и др.

Вследствие приведенной выше аналогии между зонами взаимодействия с промежуточным слоем и трещинами, в первых под действием внешней нагрузки также нарушается непрерывность касательных (и нормальных) смещений границ контактирующих тел. В результате на контуре области развивается концентрация напряжений. Их величина может оказаться достаточной для инициирования трещин нормального отрыва (или сдвига) в окрестных контактирующих выступах, а затем и разрушения последних, вследствие чего область получает приращение до следующей пары контактирующих выступов, а выделенный трещинами блок или слой пополняет промежуточный слой. Естественно предположить, что энергетические условия выкалывания типичного (характерного) для системы объема материала определяют основной вклад в затраты энергии при движении зоны проскальзывания в предельно-равновесном состоянии и величину $(\partial W/\partial S)_{cr}$. Так же, как и трещиностойкость материалов, величина $(\partial W/\partial S)_{cr}$ может быть определена в рамках внешней задачи экспериментально. В приведенной схематической модели не учтены многие детали процесса, такие как оформление катышков из выколото-го блока, роль рельефа образующихся поверхностей. Их учет не имеет принципиального значения для предлагаемого подхода. Представляется интересным провести некоторые оценки, используя параметры конкретного механизма разрушения в рамках внутренней задачи.

Рассмотрим плоскую модельную задачу. Пусть две контактирующие упругие шероховатые полуплоскости имеют зону проскальзывания размера L (рис. 1). Характерный размер шероховатости (расстояние между точками зацепления на границе контакта) - l . В окрестности (в концевой области) зоны, содержащей промежуточный слой, имеется область концентрации напряжений, в которой в частности, в состоянии предельного равновесия контура происходит развитие хрупкого выкола материала на характерную глубину $h \sim d/2$. Продвижение зоны происходит при завершении выкалывания (отделении блока материала). Следовательно, сопротивляемость

системы этому продвижению определяется совокупностью процессов необратимого деформирования и разрушения на всех участках контакта, где развивается выкалывание в пределах концевой зоны d . В соответствии с высказанными выше положениями можно утверждать, что на контуре зоны, содержащей промежуточный слой и представляемой во внешней задаче в виде эффективной трещины поперечного сдвига, в состоянии предельного равновесия выполняется условие $K_{II} = K_{IIc}$, где K_{II} - коэффициент интенсивности напряжений поперечного сдвига, K_{IIc} - критический коэффициент интенсивности напряжений поперечного сдвига. Чтобы отличить этот параметр, предлагаемый здесь для детализации трения, от используемого в механике разрушения для оценки трещиностойкости по отношению к трещинам поперечного сдвига в сплошных телах, обозначим его как T_{IIc} . В приведенной аналогии величина $(\partial W / \partial S)_{cr}$ есть аналог эффективной поверхностной энергии, поэтому в данном случае $(\partial W / \partial S)_{cr} \approx \gamma \approx (T_{IIc})^2 / 2E$, где E - эффективный модуль упругости. Величина T_{IIc} характеризует сопротивляемость системы контактирующих тел развитию промежуточного слоя. Заметим, что величину (τ_{∞}) при этом можно соотнести с интегральной характеристикой усредненного по всему пятну касания напряжения сил трения, а величину T_{IIc} , как характеристику материалов трущейся пары в условиях данного силового контакта можно найти экспериментально или оценить, исходя из модели внутренней задачи.

Следуя [6], проведем оценку T_{IIc} по параметрам внутренней задачи о выкалывании элементов качения в концевой зоне d промежуточного слоя. Считая для простоты, что область d охватывает один выкалываемый элемент, т.е. $l \sim d$, и представляя силы сцепления в виде определенного по области d касательного напряжения, соответствующего максимальной нагрузке при выкалывании блока (модель типа Дагдейла [7]), имеем

$$T_{IIc} \sim \int_0^{\ell} \tau^* / \sqrt{r} dr; \quad \tau^* = P_{max} / \ell, \quad (1)$$

где P_{max} - максимальное погонное усилие при выкалывании блоков. Величину P_{max} из соображений размерности запишем в виде $P_{max} \sim K_{IIc} h^{1/2}$, где K_{IIc} - трещиностойкость контактирующих материалов, h - поперечный размер отделяемого блока (максимальная глубина внедрения трещины), отсюда

$$T_{IIc} \sim K_{IIc} (h/l)^{1/2}. \quad (2)$$

Соответственно, $(\partial W / \partial S)_{cr} \approx \gamma \approx (T_{IIc})^2 / 2E$. Присутствие поперечного сжатия в области контакта может видоизменить приведенные соотношения. Пусть, например, сжатие вызывает появление дополнительных контактов в концевой области. В рассматриваемом приближении это означает, что размер l становится зависимым от величины σ_{∞}

$$l \sim E \Delta / \sigma_{\infty}, \quad (3)$$

где Δ - некоторое начальное раскрытие в области контакта. Воспользовавшись (3), получим из (1), (2):

$$T_{IIc} \sim K_{IIc} \sqrt{(\sigma_{\infty} h) / (E \Delta)}; \\ (\partial W / \partial S)_{cr} \sim (K_{IIc} / E)^2 (\sigma_{\infty} h / \Delta). \quad (4)$$

Заметим, что возрастание T_{IIc} с увеличением σ_{∞} может привести к смене механизма разрушения - развитию сдвиговых нарушений в основном материале (K_{IIc} конструкционных материалов примерно в два раза превышает K_{IC} [7]).

В связи с этим представляет интерес другая асимптотика, характерная для металлов, как упругопластических сред. В состоянии максимальной интенсивности воздействия на контакте таких тел касательные напряжения достигают предела текучести τ_0 . В (1) в этом случае $\tau^* = \tau_0$, а верхним пределом интегрирования становится l^* - расстояние между трещинами, образующимися на контуре эффективной трещины продольного сдвига в результате разницы между касательными напряжениями в области проскальзывания и τ_0 .

$$T_{IIc} \sim \int_0^{l^*} \tau_0 / \sqrt{r} dr = 2 \tau_0 \sqrt{l^*}, \quad (5)$$

Параметр, кратный l^* , может выступить в качестве характеристики процесса, аналогичной параметру $L_{IIc} \sim (K_{IIc} / \sigma^*)^2$, где σ^* - характерное напряжение (предел прочности), предложенному в [8]. В самом деле, из (5) получим

$$l^* \approx L_{IIc} = \frac{1}{4} (T_{IIc} / \tau_0)^2, \quad (6)$$

Таким образом, выстраивается шкала сценариев механизмов трения с разрушением контактных поверхностей в зависимости от интенсивности сжатия по нормали к этой поверхности (рис. 2). При слабом сжатии трение реализуется по классическому механизму трения шероховатых поверхностей [9]. По мере усиления сжатия процессы разрушения начинают играть все большую роль, выстраивая третье тело, элементы которого получают возможность перекачиваться под нагрузкой, снижая сопротивление трению [5]. В стационарном режиме существования структур трения, предпочтительность того или иного состояния связывается с величинами полной потенциальной энергии упругой системы, соответствующими этим состояниям. Из возможных состояний более вероятно такое, в котором полная потенциальная энергия системы меньше. Характер взаимодействия тел во внешней задаче зависит от взаимного расположения элементов в промежуточном слое.

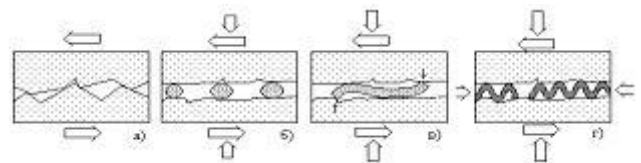


Рис. 2. Изменение структуры третьего тела по мере возрастания поперечного сжатия.

3. Изменения формы плоского элемента

Рассмотрим другую предельную ситуацию, когда сжатие настолько возрастает, что касательные напряжения в контактирующих телах при относительном смещении приближаются к пределу текучести. Известно, что в таких вариантах нагружения от контактирующих тел отделяются уплотненные элементы (чешуйки) [1-3]. В зависимости от соотношения сил нормального давления и сдвига в области контакта отделившийся в таких условиях фрагмент в дальнейшем может образовать элемент качения, либо остаться плоским элементом скольжения. В последнем случае из-за разогрева контактной поверхности повышается возможность изменения фазового состояния. Вытянутый плоский элемент может также изменить форму под действием комбинации продольных нагрузок и изгиба. В результате происходит волнообразный изгиб (сморщивание) слоя, что наблюдается в эксперименте [1]. Представляется, что контролирующим фактором, определяющим возможность формирования элемента качения, является способность выхода из плоскости (изгиба) первоначально плоского выделенного элемента в поле действующих сил.

Рассмотрим в этом варианте качественную картину эволюции плоского элемента третьего тела в режиме интенсивного касательного воздействия на его контактных поверхностях. В исходной ситуации плоский элемент третьего тела, находится между двумя сжимающими его параллельными плоскими поверхностями, смещающимися относительно друг друга вдоль плоскости контакта. Представляет интерес случай, в котором элемент третьего тела остается упругим, в то время как на его внешних границах условия нагружения приближаются к инициированию пластического течения. В этом случае плоский элемент оказывает предельное высокое сопротивление свертыванию в элемент качения.

Рассмотрим модельную задачу о распрямлении (прижатии к плоскости) упругой балки длиной $2l$, находящейся под действием распределенного изгибающего момента, вызванного касательными напряжениями, возникающими в результате трения. Эти напряжения будем считать однородными и близкими к предельному уровню.

Упругая линия балки единичной ширины прямоугольного сечения, нагруженной распределенным моментом $M(x) = \tau h x$, имеет вид

$$y'' = 12 \frac{\tau x}{Eh^2}, \quad (7)$$

где τ – касательное напряжение на границе контакта, h – толщина балки, x – координата, отсчитываемая вдоль балки от условно неподвижного сечения (см. рис. 3,а). Поперечные смещения

$$y = \frac{2\tau x^3}{Eh^2}. \quad (8)$$

Соответственно, текущий радиус кривизны такой балки будет

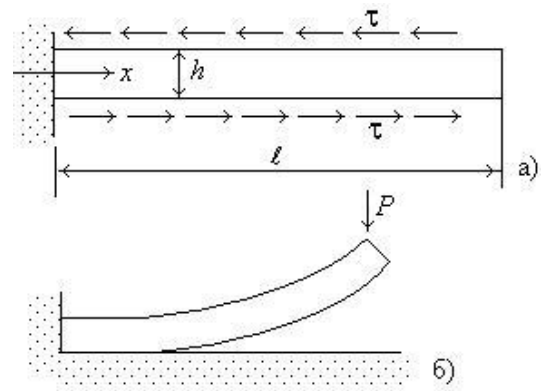


Рис. 3. Схема модельной задачи.

$$R(x) = \frac{Eh^2}{12\tau x}. \quad (9)$$

Используем далее подход, предложенный в [10]. Для распрямления балки нужно приложить к ее концу поперечную сосредоточенную силу. Эта сила обеспечивается контактом с одной из плоскостей, взаимодействующих с эффективной балкой (рис. 3,б). Упругая линия балки с учетом сдвиговых деформаций при такой операции определяется уравнением

$$\begin{aligned} M'' - AM &= \frac{GF}{R(x)k}; \\ A &= \frac{GF}{EJk} = \frac{6}{h^2(1+\mu)}; \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \end{aligned} \quad (10)$$

где G – модуль сдвига; $k = 6/5$ для балки прямоугольного сечения; F – площадь сечения балки.

Отсюда получим величину погонного изгибающего момента

$$M = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} - \tau h x; \quad \alpha = \sqrt{\frac{GF}{EJk}} = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{5}{1+\mu}}, \quad (11)$$

при очевидных условиях

$$M'_{x=0} = 0; \quad M_{x=l} = 0.$$

Окончательно имеем

$$M = \tau h \left[e^{\alpha x} \left(\frac{\ell - e^{\alpha \ell} / \alpha}{e^{\alpha \ell} + e^{-\alpha \ell}} + \frac{1}{\alpha} \right) + e^{-\alpha x} \left(\frac{\ell - e^{\alpha \ell} / \alpha}{e^{\alpha \ell} + e^{-\alpha \ell}} - x \right) \right]. \quad (12)$$

Соответственно, сила прижатия, не допускающая изгиб балки на ее конце, будет

$$P = M'(\ell) = \tau h \left[\alpha e^{\alpha \ell} \left(\frac{\ell - e^{\alpha \ell} / \alpha}{e^{\alpha \ell} + e^{-\alpha \ell}} + \frac{1}{\alpha} \right) - \alpha e^{-\alpha \ell} \left(\frac{\ell - e^{\alpha \ell} / \alpha}{e^{\alpha \ell} + e^{-\alpha \ell}} - 1 \right) \right]. \quad (13)$$

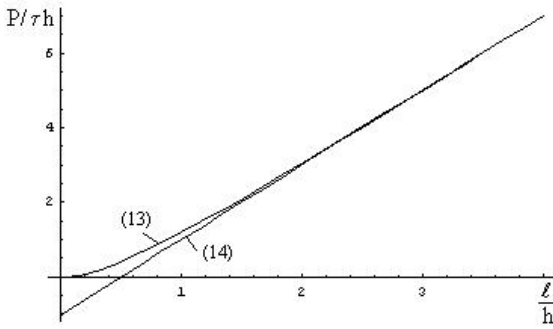


Рис. 4. Усилие, необходимое для удержания плоской балки от сворачивания в элемент качения.

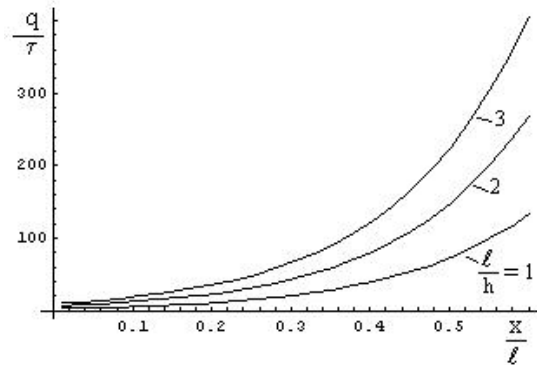


Рис. 5. Сравнение усилий, определенных по (13) и (14).

Обратим внимание на удобную для оценок асимптотику при условии $l > h$. В этом случае сила прижатия определяется соотношением

$$P \approx \tau h \left(\frac{\ell}{h} \sqrt{\frac{5}{1+\mu}} - 1 \right). \quad (14)$$

Пример оценки усилия для варианта $\mu = 0,3$ приведен на рис. 4. Сравнение усилий по формулам (13) и (14) показано на рис. 5.

Распределение контактных напряжений на границе балки и основания при том же условии получим в виде

$$\begin{aligned} q(x) &= M''(x) = \\ &= \tau h \alpha^2 \left[e^{\alpha x} \left(\frac{\ell - e^{\alpha \ell} / \alpha}{e^{\alpha \ell} + e^{-\alpha \ell}} + \frac{1}{\alpha} \right) + e^{-\alpha x} \left(\frac{\ell - e^{\alpha \ell} / \alpha}{e^{\alpha \ell} + e^{-\alpha \ell}} \right) \right] \approx \\ &\approx \frac{5 \tau \ell e^{\alpha x}}{(1+\mu)h}. \end{aligned} \quad (15)$$

Пример распределения нормальных напряжений на границе контакта показан на рис. 6. для того же варианта $\mu = 0,3$. Можно видеть, что при увеличении отношения l/h нормальные напряжения в концевой области вытянутого элемента резко возрастают. Это может изменить сценарий разрушения для вытянутых элементов. В частности, если локальный уровень напряжений превышает прочность окрестного материала, кромка плоского элемента врезается в него, затрудняя касательные смещения, и появляется возможность сморщивания элемента продольными силами.

Полученные соотношения позволяют оценить нагрузку в области контакта, необходимую для удержания

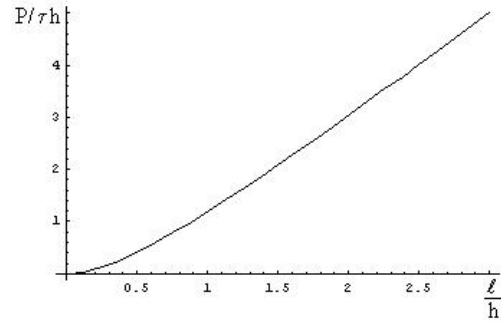


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений на границе контакта.

элементов от сворачивания при различной плотности распределения элементов по линии контакта n , 1/м. Среднее напряжение на этой линии будет

$$\sigma_n \approx P/n \approx \frac{\tau h}{n} \left(\frac{\ell}{h} \sqrt{\frac{5}{1+\mu}} - 1 \right). \quad (16)$$

Таким образом, в рамках плоской задачи получен критерий инициирования свертывания плоского элемента в элемент качения.

Работа поддержана грантом 11-08-12098-ОФИ-М-2011, а также Программой Фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН № 12.

Литература

1. Е.А. Marchenko. About the Nature of Metal Surface Fracture in Friction. Moscow: Nauka. (1979) 120 p. (in Russian) [Е.А. Марченко. О природе разрушения поверхности металлов при трении. М.: Наука. (1979) 120 с].
2. V.I. Vladimirov. Electronic J.: Friction, Wear, Lubrication, **10**(2), 7 (2008) [В.И. Владимиров. Электронный журнал: Трение, износ, смазка. **10**(2), 7 (2008)].
3. N.M. Alekseev, R.I. Bogdanov, N.A. Bushe et al. Friction and Wear. **6**, 965 (1988) [Н.М. Алексеев, Р.И. Богданов, Н.А. Буше и др. Трение и износ. **6**, 965 (1988)].
4. N. M. Alekseev. Friction and Wear. **2**, 197 (1989) [Н.М. Алексеев. Трение и износ. **2**, 197 (1989)].
5. N.M. Alekseev, R.V. Goldstein, N.M. Osipenko. Mechanics of Solids. **5**, 134 (1992) [Н.М. Алексеев, Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко. Известия АН СССР МТТ. **5**, 134 (1992)].
6. G.I. Barenblatt. Appl. Mech. Techn. Phys. **4**, 3 (1961) [Г.И. Баренблатт. ПМТФ. **4**, 3 (1961)].
7. K. Hellan. Introduction to Fracture Mechanics. McGraw-Hill Book Company (1984) 364 p.
8. R.V. Goldstein, V.M. Vainshelbaum. Material scale length as a measure of fracture toughness in fracture mechanics of plastic materials. Int. J. Fracture. **14**(2), 185 (1978).
9. I.V. Kragelski, M.N. Dobychin, V.S. Komalov. Foundations of Calculations of Friction and Wear. Moscow: Mashinostroenie (1977) 256 p. [И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение (1977) 576 с].
10. V.I. Feodos'ev. Selected Problems and Questions on Strength of Materials. Moscow: Nauka (1973) 400 p. [В.И. Феодос'ев. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука (1973) 400 с].