

УДК 621.787.4

К.Ф.Митряев, А.С.Беляев

СИЛЫ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей из высокопрочных сталей все шире начинают применять отделочно-упрочняющую обработку алмазным выглаживанием. Наиболее распространенным является выглаживание сферическими наконечниками с $R_{\text{сф}} = 1-3$ мм на токарном станке.

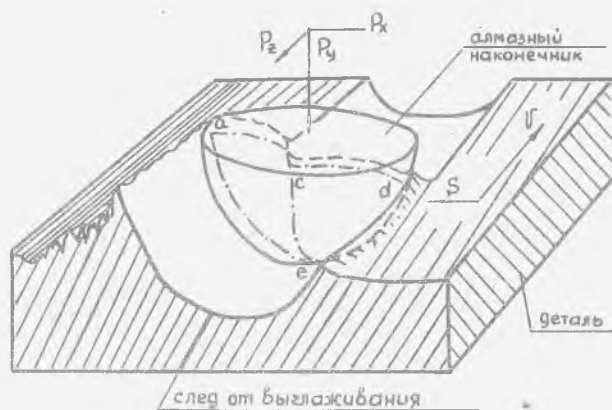


Рис. 1. Схема алмазного выглаживания сферическим наконечником.

На рис. 1 приведена схема выглаживания сферическим наконечником. Под действием радиальной силы P_r наконечник вдавливаются в металл, сжимая и пластически деформируя исходные микровыступы поверхности.

При движении наконечника со стороны набегающих потоков металла в направлении векторов скорости образуется подвижный валик в виде волны, от которого металл растекается в стороны. За наконечником образуется канавка.

Подтверждением к сказанному являются профилограммы, снятые в месте перехода от выглаженной поверхности к исходной в осевом и тангенциальном направлениях (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что с боковых сторон и впереди наконечника образуются значительные наплывы, с задней стороны наплывы отсутствуют.

При повторных оборотах, вследствие подачи, величина которой обычно меньше ширины канавки, металл испытывает вторичную деформацию и вновь перераспределяется.

В результате со стороны обрабатываемой поверхности в направлении подачи (оси детали) образуется значительный наплыв в виде гребня. Со стороны обработанной поверхности наплыв имеет вид небольшой пологой волны, которая, в конечном счете, и определяет микрорельеф выглаженной поверхности с шагом неровностей, равным величине подачи.

С задней стороны наконечника выпучивание металла происходит, в основном, за счет упругого восстановления.

Асимметрия образующихся наплывов и выпучивания в сочетании с трением в зоне контакта обуславливают появление тангенциальной P_x и осевой P_z сил, влияют на их уровень и изменения в зависимости от режима алмазного выглаживания. Схема действия сил P_r , P_x представлена на рис. 1. Изучение их дает возможность получить более полное представление о сущности явлений, происходящих при выглаживании, раскрыть механизм формирования поверхности и определить пути регулирования ее качества.

Для теоретического определения силы P_r представленную схему, в первом приближении, можно отождествить с внедрением сферы в полубесконечное пространство на глубину h , которая должна превышать высоту микронеровностей исходной поверхности. В начальный момент выглаживания эта схема будет достаточно точной. В дальнейшем, при движении наконечника отсутствие пластического контакта с задней стороны компенсируется образованием наплыва и с боков и упругим вос-

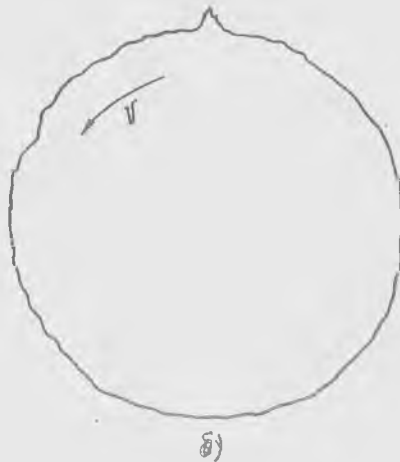
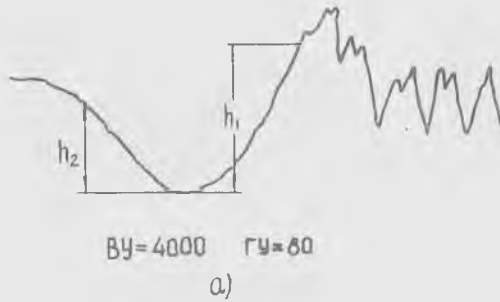


Рис. 2. Профилограммы микро рельефа в месте перехода от выглаженной поверхности к исходной (сталь ЭИ643)

а) в осевом направлении. б) в тангенциальном направлении
Режим выглаживания: $S=0,05$ мм/об; $V=51$ м/мин; $P_y=20$ кг, $R_{ср}=1,8$ мм.

становлением сзади, так что площадь фактического контакта можно принять постоянной, на что указывается в работах [3], [4].

Распределение нормальных напряжений (σ_n) на поверхности контакта без учета трения, по А.Д.Томленову [2], выражается формулой:

$$\sigma_n = \sigma_s \left(1 + \frac{\gamma}{2} - \gamma \right), \quad (1)$$

где σ_s - предел текучести материала при сжатии с учетом упрочнения; γ - переменный параметр.

Суммируя напряжение по всей контактной поверхности сферической лунки, было получено выражение для подсчета необходимой радиальной силы [1].

$$P_y = 5,14 \gamma h \sigma_s R_{сф.}, \quad (2)$$

где h - глубина вдавливания сферы в металл. Формула (2) является приближенной. Она не учитывает трение в зоне контакта и зависимость от высоты и характера микронеровностей обрабатываемой поверхности.

При вдавливании сферического индентора в плоскость в результате трения образуется область пластического равновесия, которая движется вместе с индентором как жесткое тело. Эта область имеет форму конуса, прилегающего к нижней части индентора. Размеры ее зависят от величины коэффициента трения μ и радиуса сферы. При $\mu = 0$ она отсутствует. Наши исследования трения при алмазном выглаживании высокопрочных закаленных сталей ЗОХСНА и ЭИ64З показали, что коэффициент трения мал и колеблется в пределах 0,02-0,1. Зона пластического равновесия в этом случае мала и при расчете силы P_y ее можно не учитывать.

Распределение нормальных напряжений на поверхности контакта при наличии трения, без учета области пластического равновесия, можно представить в следующем виде [2]:

$$\sigma_n = \sigma_s \left(\frac{3\gamma}{4} - \frac{\arccos 2\mu}{2} + \frac{\sqrt{1-4\mu^2}}{2} + \frac{1}{2} - \gamma \right) \quad (3)$$

из рис. 3 имеем

$$\gamma = \arcsin \frac{\rho}{R_{сф.}},$$

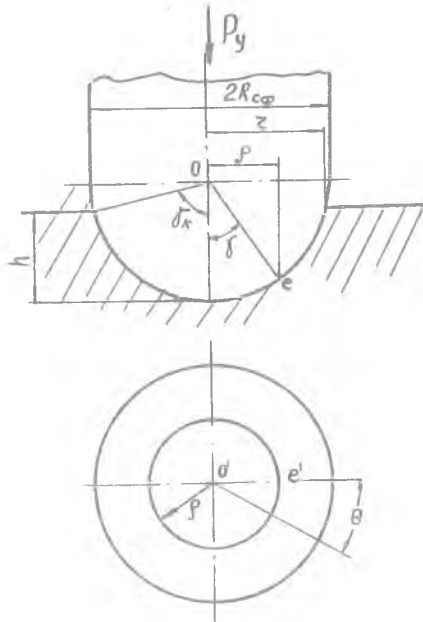


Рис. 3. Схема вдавливания сферического пуансона в пластическое полубесконечное пространство под действием силы P_y .

где ρ - текущий радиус.

Суммируя напряжения по всей контактной поверхности сферической лунки, получим выражение для подсчета силы вдавливания.

$$P_y = \int_0^z \int_0^{2\pi} \sigma_s \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\arcs \cos 2\mu}{2} + \frac{\sqrt{1-4\mu^2}}{2} + 0,5 - \arcs \sin \frac{\rho}{R_{ссп}} \right) \rho d\rho d\theta.$$

После интегрирования имеем

$$P_y = \pi z^2 \epsilon_s \left[\frac{3\pi}{4} - \frac{\arccos 2\mu}{2} + \frac{\sqrt{1-4\mu^2}}{2} + 0,5 - \left(1 - \frac{R_{\text{сф}}^2}{2z^2} \right) \arcsin \frac{z}{R_{\text{сф}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\text{сф}}}{z} \sqrt{1 - \frac{z^2}{R_{\text{сф}}^2}} \right] \quad (4)$$

Связь между радиусом z и высотой лунки h выражается формулой

$$z \approx \sqrt{2R_{\text{сф}} \cdot h} \quad (5)$$

Расчеты показывают, что сумма пятого и шестого членов в формуле (4) близка к нулю. После их исключения и подстановки значения (5) формула (4) приводится к виду:

$$P_y = 2\pi R_{\text{сф}} \cdot h \cdot \epsilon_s \cdot A, \quad (6)$$

где

$$A = \frac{3\pi}{4} - \frac{\arccos 2\mu}{2} + \frac{\sqrt{1-4\mu^2}}{2} + 0,5 \quad (7)$$

Для нахождения связи между параметрами h и высотой неровностей R_z были проведены эксперименты по вдавливанию алмазных наконечников в поверхность с различными величинами R_z . Полученная зависимость представлена на рис. 4 и может быть выражена уравнением

$$h = 0,005 R_z^{0,15} \quad (8)$$

Окончательно формула для расчета силы P_y с учетом (8) получает вид:

$$P_y = 0,01\pi R_{\text{сф}} \cdot \epsilon_s R_z^{0,15} \cdot A \quad (9)$$

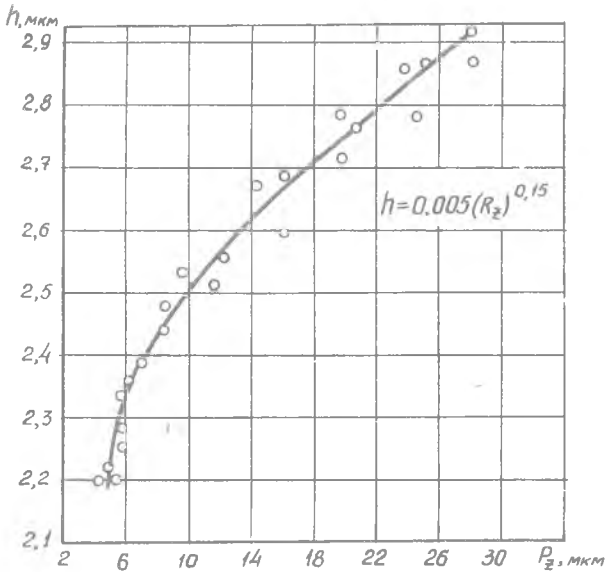


Рис. 4. Зависимость глубины вдавливания h от высоты неровностей для различных радиусов сферы ($R_{сф}$).

Для нахождения аналитического выражения силы P_z используем закон распределения нормальных напряжений, определяемый выражением (3). Распределение контактных касательных напряжений, возникших в результате трения, выражается формулой (2):

$$\tau_k = \mu \sigma_s \quad (10)$$

Величина силы P_z определяется интегралами от нормальной и касательной компонент контактных напряжений, взятых по соответствующим участкам поверхности контакта. Расчетная схема приведена на рис. 5.

Величина h_1 является заглублением наконечника в процессе его движения. На основании работ [3], [4] она связана с глубиной вдавливания h , в статическом состоянии, соотношением

$$h_1 = 2h \sqrt{1 + \nu^2}.$$

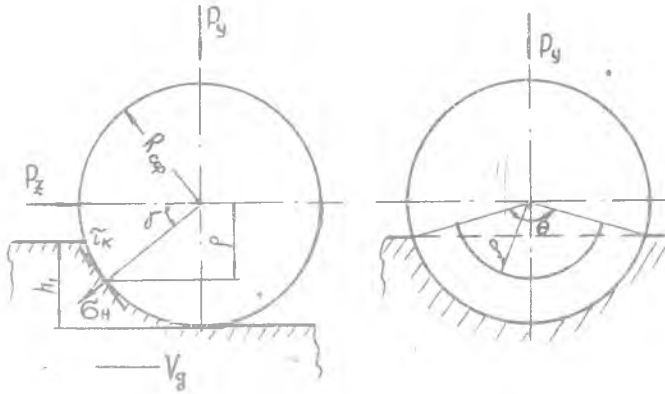


Рис. 5. Схема для расчета тангенциальной силы P_z .

Коэффициент трения μ мал ($0,02 \div 0,1$), поэтому значением μ^2 можно пренебречь и с учетом (8) данное выражение можно представить в виде

$$h_1 = 0,01 R_z^{0,15} \quad (II)$$

Из рис. 5 имеем

$$P_z = P_z^{\sigma_H} + P_z^{\tau_K} = \int_0^{\arccos\left(1 - \frac{4h_1}{R_{ср}}\right)} \int_{R-h_1}^R \sigma_H \rho d\rho d\theta + \\ + \int_0^{\arccos\left(1 - \frac{4h_1}{R_{ср}}\right)} \int_0^{\gamma} \tau_K \cdot R_{ср}^2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma d\gamma d\theta$$

После интегрирования, а также с учетом (3), (10), (II) получаем

$$P_z = \arccos\left(1 - \frac{4 \cdot 0,01 R_z^{0,15}}{R_{ср}}\right) \sigma_H \cdot R_{ср} \cdot 0,01 R_z^{0,15} (A + \mu) \quad (I2)$$

Из формулы (9) имеем

$$0,01R_z^{0,15} = \frac{P_y}{\sqrt{R_{\text{сф}} \cdot \sigma_s \cdot A}} \quad (13)$$

После подстановки (13) в (12) получаем

$$P_z = \frac{P_y}{\sqrt{1}} \left(1 + \frac{M}{A} \right) \arccos \left(1 - \frac{4P_y}{\sqrt{R_{\text{сф}}^2 \cdot A \cdot \sigma_s}} \right) \quad (14)$$

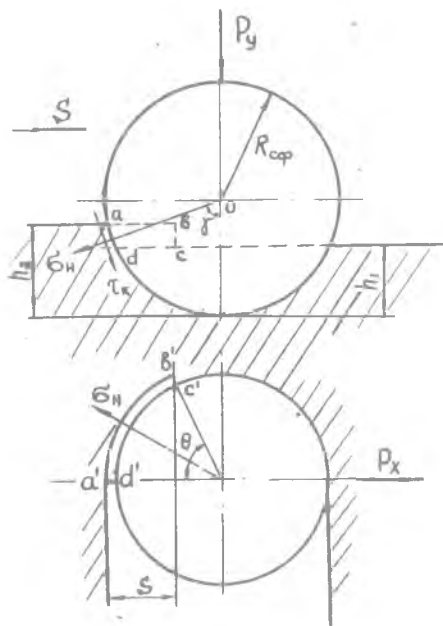


Рис. 6. Схема для расчета осевой силы P_x .

Осевая сила P_x определяется действием нормальных и касательных напряжений на участке контактной поверхности "abcd" рис. 6. Величина этого участка обусловлена разностью высот напыла (h_2) и выпучивания (h_1), а также подачи S . Ввиду малости площадки "abcd", распределение нормальных напряжений примем независимым от координаты y .

$$G_H = G_s \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) = 2,57 G_s$$

Принимаем, что участок "abcd" является прямоугольником, площадь которого (рис. 6) определяется выражением

$$F_{abcd} = (h_2 - h_1) \sqrt{2R_{сф} \cdot S}.$$

Из рис. 6 имеем

$$P_x = P_x^{G_H} + P_x^{T_K}$$

$$P_x^{G_H} = F_{abcd} \cdot 2,57 G_s \cdot \sin \gamma \cdot \cos \frac{\theta}{2} =$$

$$= 2,57 G_s (h_2 - h_1) \sqrt{2S(h_2 + h_1)}$$

$$P_x^{T_K} = F_{abcd} \cdot \mu G_s \cos \gamma \cdot \cos \frac{\theta}{2} =$$

$$\mu G_s (h_2 - h_1) \left(1 - \frac{h_2 + h_1}{2R_{сф}}\right) \cdot \sqrt{2R_{сф} \cdot S}$$

Окончательно

$$P_x = P_x^{G_H} + P_x^{T_K} = G_s (h_2 - h_1) \sqrt{2R_{сф} \cdot S} \left[2,57 \sqrt{\frac{h_2 + h_1}{R_{сф}}} + \mu \left(1 - \frac{h_2 + h_1}{2R_{сф}}\right) \right] \quad (15)$$

Как видно из формулы (15), сила P_x в значительной мере зависит от значений высот напыла h_2 и выпучивания h_1 . При $h_2 = h_1$ сила, действующая на наконечник со стороны напыла, полностью уравновешивается силой, действующей со стороны выпучивания, и правая часть выражения (15) обращается в нуль.

Определение значений h_2 и h_1 , ввиду малости зоны контакта, затруднительно. Поэтому полученная формула не может быть использована для практического расчета осевой силы P_x , однако ее анализ помогает раскрытию сущности процесса формирования поверхностного слоя, а также оценке деформационно-напряженного состояния зоны контакта.

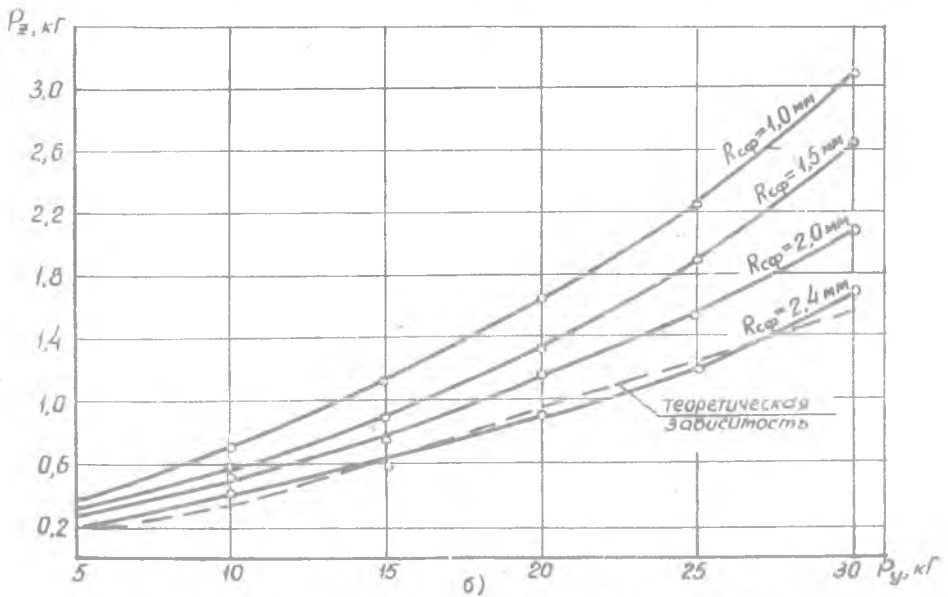
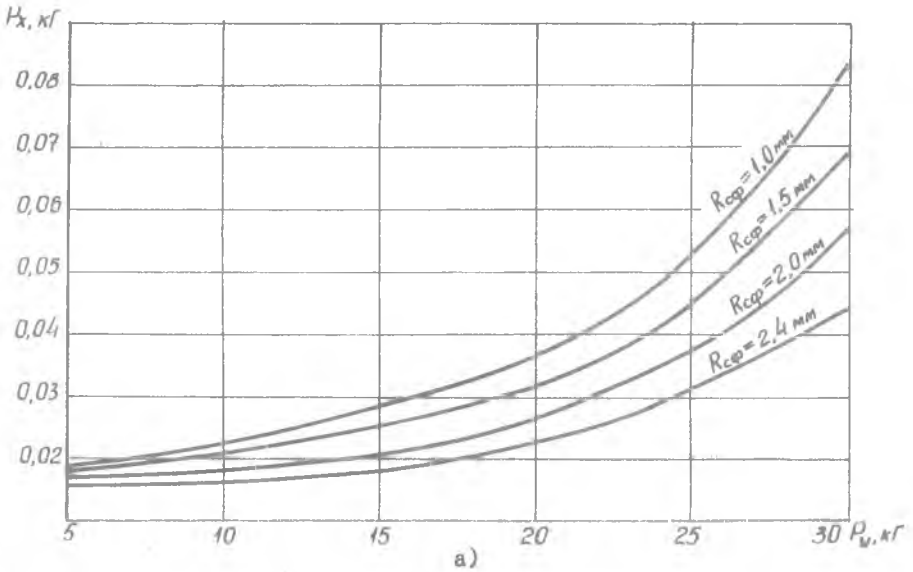


Рис. 7. Зависимости тангенциальной (P_z) и осевой (P_x) сил от усилия прижима P_y для различных радиусов сферы наконечника (сталь ЗИ643).

Для подтверждения и проверки рассмотренных теоретических рассуждений было проведено экспериментальное измерение сил P_z и P_x при различных усилиях прижима P_y (рис. 7а, б). Из рисунка видно, что при изменении P_y от 5 до 30 кг сила P_z увеличивается от 0,3 до 3,0 кг, P_x - от 0,02 до 0,09 кг.

Пунктирная кривая на рис. 7а отображает изменение силы P_z (для $R_{сф.} = 2,0$ мм) в соответствии с формулой (14). Как видно, теоретические расчеты удовлетворительно совпадают с экспериментом. Наибольшее расхождение (20%) имеет место при $P_y = 30$ кг, что, по-видимому, связано со спецификой деформационных процессов в зоне контакта при значительных нагрузках.

Из рис. 7а, б также видно, что сила P_x мала, примерно в 5 раз меньше P_z . Это связано с тем, что составляющая силы деформации P_x в большей мере уравнивается за счет перетекания металла к примерно одинакового его выпучивания с боковых сторон. В тангенциальном же направлении пластическое выпучивание происходит с одной стороны, чем и объясняется значительная величина измеренной силы P_x . На рис. 8 представлена диаграмма изменения силы P_x на входе и выходе при выглаживании образца цилиндрической формы из материала ЗОХГСА.

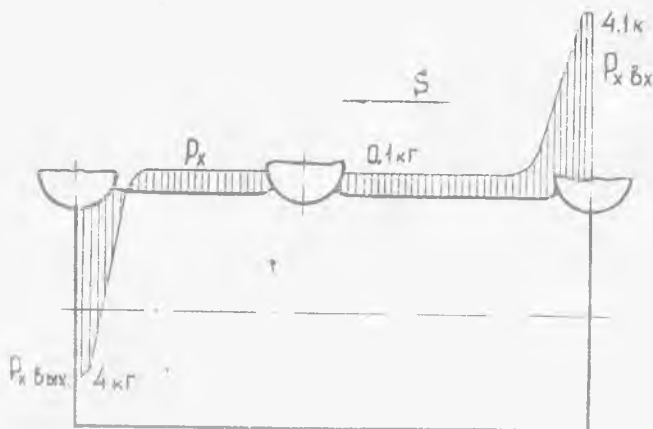


Рис. 8. Диаграмма изменения силы P_x на входе и выходе при выглаживании образца цилиндрической формы

В момент входа контакт алмазного наконечника с деталью осуществляется только с одной стороны, сила R_x достигает значения $R_x \text{ вх.} = 4,1 \text{ кг}$. По мере продвижения наконечника по детали площадь контакта увеличивается, появляется выпучивание металла с противоположной стороны, что приводит к возникновению уравновешивающей силы. Результирующая сила начинает уменьшаться до значения $R_x = 0,1 \text{ кг}$. При выходе наконечника из детали наблюдается обратная картина. Сила R_x уменьшается, проходит через нуль и начинает расти в другом направлении. К моменту выхода, когда контакт наконечника с образцом осуществляется только с одной стороны, сила R_x снова достигает большого значения ($R_x \text{ вых.} = 4,0 \text{ кг}$). Разница сил на выходе и на входе определяет силу R_x , которая имеет место в стационарном процессе выглаживания.

Расчеты по формулам для определения сил R_y , R_z и R_x дают удовлетворительную сходимость с экспериментом. Это подтверждает правомерность принятой схемы выглаживания и сделанных допущений, а также дает возможность использовать полученные зависимости для практических целей.

Литература

1. Производительность, качество обработки и надежность в эксплуатации изделий из жаропрочных и титановых сплавов. Труды КуАИ, вып. 43, Куйбышев 1970.
2. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением. М., Машгиз, 1963.
3. Михин Н.М. О связи площади касания и сближения при неподвижном и скользящем контактах. Сб. "Трение твердых тел". Из-во "Наука", 1964.
4. Крагельский И.В. Трение и износ. "Машиностроение", 1968.