

УДК 621.891

И. Б. Покрас, доктор технических наук, профессор;  
 Н. С. Сивцев, доктор технических наук, профессор;  
 Ю. О. Михайлов, доктор технических наук, профессор  
 В. П. Шеногин, доктор технических наук, профессор  
 Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ\*

*Рассмотрены закономерности граничного трения в процессах обработки металлов давлением. Принято, что смазка нивелирует поверхность заготовки, заполняя все впадины, и в процессе деформирования она не выдавливается, физико-химические и гидродинамические аспекты действия смазок не рассматриваются.*

**Ключевые слова:** трение, обработка давлением, смазка

Для анализа закономерностей граничного трения примем, что смазка нивелирует поверхность заготовки, заполняя все впадины. Примем далее, что в процессе деформирования смазка не выдавливается из впадин. Физико-химические и гидродинамические аспекты действия смазок не рассматриваются.

На рис. 1 показана модель взаимодействия твердых тел при нормальном приложении нагрузки, предложенная Е. М. Макушком [1, 2].

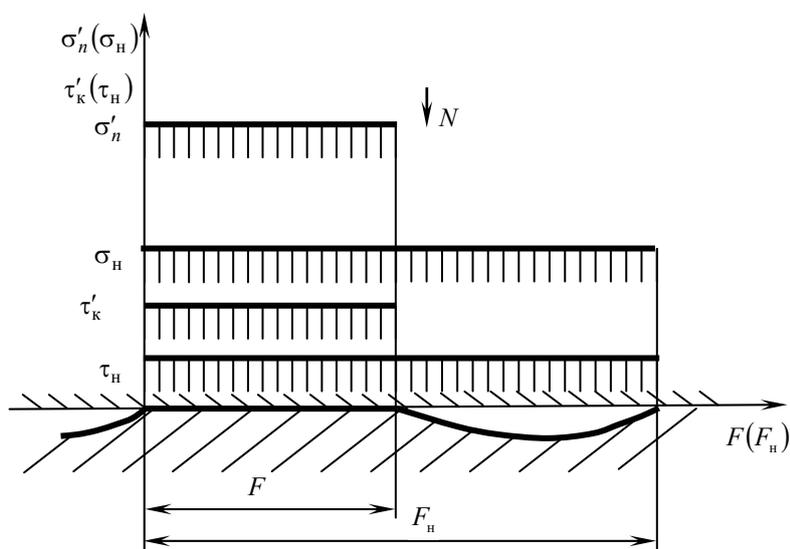


Рис. 1. Плоская модель контактного взаимодействия твердых тел по Е. М. Макушку [1]

© Покрас И. Б., Сивцев Н. С., Михайлов Ю. О., Шеногин В. П., 2012

\* Финансирование публикации осуществлено за счет средств субсидии Министерства образования и науки Российской Федерации, направленной на реализацию комплексного проекта «Организация высокотехнологичного производства конденсаторов нового поколения», шифр 2010-218-02-259.

Первые площадки фактического контакта возникают на наиболее высоких микронеровностях заготовки. Под действием нормальной нагрузки  $N$  происходит их смятие, в результате чего площадь фактического контакта увеличивается. Элементарная сила трения  $T$  на площадке фактического контакта  $F$  и вызывающая ее нормальная нагрузка  $N$  (рис. 1) представлены эпюрами касательных  $\tau'_k$  и нормальных  $\sigma'_n$  напряжений и соответствующих им средних напряжений  $\tau_n$  и  $\sigma_n$ , действующих на номинальной площадке контакта  $F_n$ .

Для возникновения контактного скольжения необходимо преодолеть сопротивление деформируемого металла  $\tau'_k$  на площадках фактического контакта  $F$ . Это сопротивление определит величину контактного трения  $T$ :

$$T = \tau'_k F. \tag{1}$$

Рассмотренная плоская модель взаимодействия твердых тел является простейшей, однако именно она раскрывает физическую сущность трения, как сопротивления сдвигу и устанавливает допустимый предел ее возрастания. Предполагая, что площадь фактического контакта при росте нормальной нагрузки достигает номинальной величины  $F = F_n$ , а касательные напряжения на ней не могут превышать предельную величину сопротивления сдвигу при пластической деформации, предельная сила трения определится:

$$T = kF_n, \tag{2}$$

где  $k$  – константа сдвига.

При принятых допущениях с учетом (1) и (2) сопротивление сдвигу на контакте в случае граничного трения определяется зависимостью

$$\tau = \tau_{\max} \frac{F}{F_n}, \tag{3}$$

где  $\tau_{\max}$  – сопротивление сдвигу на контакте при полном заполнении впадин между микронеровностями инструмента;  $\frac{F}{F_n}$  – относительная фактическая площадь контакта.

Относительная фактическая площадь контакта инструмента с заготовкой при обработке металлов давлением в условиях граничного трения может быть определена следующим образом.

В начальный момент взаимодействия (до начала пластической деформации заготовки) смятие микронеровностей происходит вследствие сжимаемости смазки, определяемой модулем ее объемной упругости  $E_{см}$ . Схема к расчету смятия гребешков на этой стадии приведена на рис. 2.

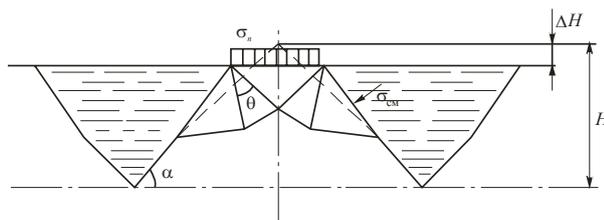


Рис. 2. Схема к расчету граничного трения:  $H$  и  $\Delta H$  – соответственно начальная высота и величина смятия микронеровности заготовки

Сопротивление смятию  $\sigma_n$  в соответствии с изображенным полем линий скольжения может быть найдено из выражения:

$$\sigma_n = 2k \left( 1 + \theta + \frac{p_{\text{см}}}{2k} \right), \quad (4)$$

где  $\theta = \frac{\pi}{2} - \beta$ , здесь – угол наклона микронеровностей инструмента к плоскости контакта;  $p_{\text{см}}$  – гидростатическое давление в слое смазки, запертой инструментом во впадинах деформированных микронеровностей заготовки:

$$p_{\text{см}} = \varepsilon_{\text{см}} E_{\text{см}} = \frac{2\Delta H}{H} E_{\text{см}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{см}}$  – относительная величина смятия микронеровностей заготовки.

Если принять, что пластическая деформация заготовки начинается в момент, когда давление на контакте достигнет предела текучести  $\sigma_s$ , то можно определить относительную величину смятия микронеровностей, соответствующую этому моменту.

С учетом наличия зон смятия микронеровностей и зон, занятых смазкой (рис. 2), из условия равенства давления на контакте пределу текучести можно записать:

$$\sigma_n F + p_{\text{см}} (F_n - F) = \sigma_s F_n. \quad (6)$$

Преобразуем выражение (6) к виду:

$$\sigma_n \frac{F}{F_n} + p_{\text{см}} \left( 1 - \frac{F}{F_n} \right) = \sigma_s. \quad (7)$$

После подстановки значений  $\sigma_n$  и  $p_{\text{см}}$  из (4), (5) с учетом, что  $F/F_n \approx \Delta H/H$ , из (7) получим:

$$\varepsilon_{\text{см}} = \frac{\Delta H}{H} = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{2} - \beta + \frac{2E_{\text{см}}}{\sigma_s}}.$$

В процессе пластического деформирования заготовки дальнейшее смятие микронеровностей становится возможным вследствие увеличения площади контакта. В силу допущения, что смазка не выдавливается из зоны контакта, увеличение площади контакта приведет к уменьшению толщины слоя смазки. Из условия постоянства объема в этом случае для определения относительной площади фактического контакта получим следующее выражение:

$$\frac{F}{F_n} = 1 - \sqrt{1 - (\varepsilon + \varepsilon_{\text{см}})}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – степень деформации заготовки.

Из анализа формул (3) и (8) следует, что в случае граничного трения сопротивление сдвигу на контакте (касательное напряжение) увеличивается с ростом степени деформации. Эта зависимость, подсчитанная по формуле (3) с учетом (8) для двух марок сталей, представлена на рис. 3.

Полученные выше результаты можно обобщить на случай объемного течения. Следуя А. И. Целикову [3], запишем:

$$n_\sigma = \frac{p_{\text{об}}}{p}, \quad (9)$$

где  $p_{об}$  – давление при объемном напряженном состоянии;  $p$  – соответствующее давление при плоском напряженном состоянии.

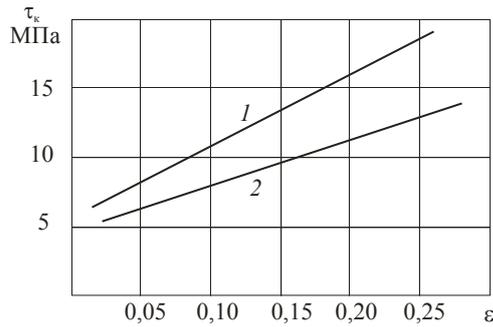


Рис. 3. Зависимость контактных касательных напряжений от степени деформации для граничного трения: 1 – сталь 30; 2 – сталь 50

Рассматривая процесс контактного скольжения как течение в сужающемся отверстии трубы, будем иметь [4]:

при плоской деформации

$$p = 2k(1 + \mu \operatorname{tg} \beta) \ln \frac{F_0}{F}; \quad (10)$$

при объемной деформации

$$p_{об} = 2kn'_\sigma \theta \ln \frac{F_0}{F}, \quad (11)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $F_0$  и  $F$  – начальная и текущая площади сечения сужающегося канала;  $n'_\sigma$  – коэффициент, учитывающий влияние среднего напряжения.

$$\mu = \frac{1}{2} \arccos \frac{\tau_a}{k}; \quad n'_\sigma = \sqrt{\frac{3}{3 + \mu_\sigma^2}};$$

$$\mu_\sigma = \frac{\sigma_2 - 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)}{0,5(\sigma_1 + \sigma_3)}; \quad \theta = 1 + \frac{\mu}{n'_\sigma} \frac{\Pi l}{\Delta F},$$

где  $\tau_a$  – адгезионная составляющая сил трения;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения;  $\Pi$  – полусумма начального и конечного контактного периметров;  $l$  – протяженность канала течения;  $\Delta F$  – изменения площади сечения.

Подставляя (10) и (11) в (9), получим:

$$n_\sigma = n'_\sigma n''_\sigma = \sqrt{\frac{3}{3 + \mu_\sigma^2}} \frac{1 + \frac{\mu}{n'_\sigma} \frac{\Pi l}{\Delta F}}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta},$$

где  $n''_\sigma$  – коэффициент, учитывающий влияние внешнего трения.

Значение коэффициента  $n'_\sigma$  колеблется от 1 до 0,87, а  $n''_\sigma = 1$  при  $\tau_a = 0$ .

При расчете сил трения в случае объемного течения следует иметь в виду, что касательные напряжения будут меняться в зависимости от направления скольже-

ния. Это вызвано тем, что параметры шероховатости инструмента, в частности угол наклона микронеровностей вдоль и поперек следов механической обработки, различны ( $\beta_{\text{поп}} > \beta_{\text{пр}}$ ). Причем эта разница зависит от чистоты обработки, и для более шероховатых поверхностей она больше, а для менее шероховатых поверхностей – меньше.

Изменение касательных напряжений в зависимости от направления скольжения может быть представлено следующей зависимостью:

$$\tau = \tau_{\text{поп}} \sin \phi + \tau_{\text{пр}} \cos \phi,$$

где  $\tau_{\text{поп}}$  и  $\tau_{\text{пр}}$  – значение касательных напряжений поперек и вдоль следов механической обработки;  $\phi$  – угол между направлением скольжения и направлением следов механической обработки.

Среднее сопротивление сдвигу на контакте при этом можно найти из выражения

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau d\phi = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\tau_{\text{поп}} \sin \phi + \tau_{\text{пр}} \cos \phi) d\phi = \frac{2}{\pi} (\tau_{\text{поп}} + \tau_{\text{пр}}).$$

Угол наклона микронеровностей связан с параметрами шероховатости инструмента следующей зависимостью [5]:

$$\operatorname{tg} \beta = 4R_a \lambda,$$

где  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;  $\lambda$  – среднее число пересечений кривой профиля своей средней линией на единицу длины:

$$\lambda = \frac{2}{S_m},$$

где  $S_m$  – средний шаг неровностей.

Упрочнение материала заготовки в процессе контактного взаимодействия приближенно можно учесть, согласно [6], исходя из средней интенсивности деформаций  $\varepsilon_m = p/2k$ .

#### Библиографические ссылки

1. Макушок Е. М., Калиновская Т. В., Белый А. В. Массоперенос в процессах трения. – Минск : Наука и техника, 1978. – 272 с.
2. Макушок Е. М. Самоорганизация деформационных процессов. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 272 с.
3. Целиков А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 494 с.
4. Пластическое формоизменение металлов / Г. Я. Гун, П. И. Полухин, В. П. Полухин и др. – М. : Metallurgiya, 1968. – 416 с.
5. Харач Г. М., Эклер Л. И. Об определении характеристик микрогеометрии поверхности со случайной шероховатостью при расчетах трения и износа // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа : сб. ст. / отв. ред. А. Ю. Ишлинский, Н. Б. Демкин. – М. : Наука, 1971. – С. 169–175.
6. Джонсон В., Кудо Х. Механика процесса выдавливания металла. – М. : Metallurgiya, 1965. – 174 с.

\*\*\*

*I. B. Pokras*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
*N. S. Sivtsev*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*Y. A. Mikhailov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
*V. P. Shenogin*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Regularities of boundary friction at metal forming

*Regularities of boundary friction at metal forming processes are considered. Lubrication is accepted to grade the billet surface, filling all troughs. It is not extruded during the deformation process. Physical-chemical and hydrodynamic properties of lubrication are not considered.*

**Keywords:** friction, metal forming, lubrication

Получено: 16.05.12

УДК 62-1/-9

*Ф. А. Уразбахтин*, доктор технических наук, профессор;  
*А. Ю. Уразбахтина*, кандидат технических наук, доцент  
Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета  
имени М. Т. Калашникова

### ЭНЕРГОЗАПАС ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ \*

*Рассматривается функционирование технических устройств как процесс преобразования одного вида в другой энергетических потоков. В ходе этого преобразования техническими объектами проявляются различные по своей физической природе свойства. Для оценки этих проявлений дается обоснование введенного понятия энергозапаса.*

**Ключевые слова:** энергетический поток, энергия, энергозапас, ресурс, качество, внутренняя энергия, техническое устройство, объект познания

Одно из представлений реального мира основано на энергетических потоках, которые часто называются полями. Эти потоки генерируются электрическими, магнитными, электромагнитными, гравитационными, ядерными, тепловыми, силовыми и прочими полями. В совокупности такие потоки образуют полный энергетический поток, в котором при движении постоянно происходят преобразования. Суть этих преобразований заключается в переходе энергии от одного вида в другой [1]. Этот энергетический поток действует в пространстве и во времени. Он перемещается от одного объекта к другому, например, от нашего спутника Луны к планете Земля, от главной звезды нашего созвездия Солнца – к Земле и т. д. Энергетический поток проходит через воздушную, водную и безвоздушную среды.

Некоторые из этих потоков известны. Например, вид энергетического потока, движущийся от Луны, называется планетарным. Благодаря их действию [1] на Земле, ночью хочется спать. Замечено, что особенно это проявляется после четырех часов утра на той части Земли, где Луна светит.

Поток является плотным сгустком энергии. Он способен «впитывать» в себя другие виды энергетических потоков, которые, достигнув определенного объема

---

© Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю., 2012

\* Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.