УДК 621.777

В. З. Спусканюк, И. М. Коваленко, Я. Е. Бейгельзимер, А. А. Миланин

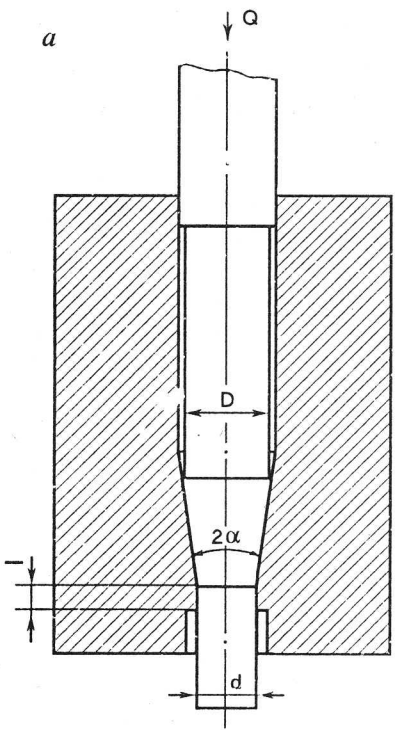
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ГИДРОПРЕССОВАНИЯ И РЕДУЦИРОВАНИИ ЗАГОТОВОК

Донецкий физико-технический институт АН Украины, 340114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

Статья поступила в редакцию 27 июля 1993 г.

Методом идентификации теоретических и экспериментальных значений удельного усилия при редуцировании, гидропрессовании, гидропрессовании с противодавлением и гидромеханическом прессовании с противодавлением оценивались значения коэффициента трения. Исследование эффективности смазочного слоя осуществлялось также на основании анализа шероховатости поверхности деформированных изделий. Показано, что для сравнения эффективности смазочного слоя при различных методах деформирования более простой и удобной является методика оценки коэффициента экранирования заготовок.

Исследованы некоторые возможности экспериментально-аналитической оценки эффективности смазочного слоя при различных методах пластического деформирования заготовок. Цель работы состояла в определении наиболее простой и удобной методики оценки эффективности смазочного слоя и сравнении результатов при рассматриваемых методах деформирования заготовок.



Пластическая деформация заготовок осуществлялась редуцированием, гидромеханическим и гидростатическим прессованием, в том числе с противодавлением (рис. 1). При этом обеспечивались различные условия смазки в процессе истечения материала через матрицу материала, поскольку на заготовку при редуцировании воздействует только механическая нагрузка, при гидростатическом прессовании — только жидкость высокого давления, при гидромеханическом прессовании осуществлялось комбинированное воздействие. Во всех случаях исходные образцы подготавливались в идентичных условиях, наносилось цинко-фосфатное покрытие, производилось омыливание и сушка смазочного слоя, использовались матрицы с углом воронки, равным $2\alpha = 10°$ либо $2\alpha = 20°$, диаметром калибрующего пояска

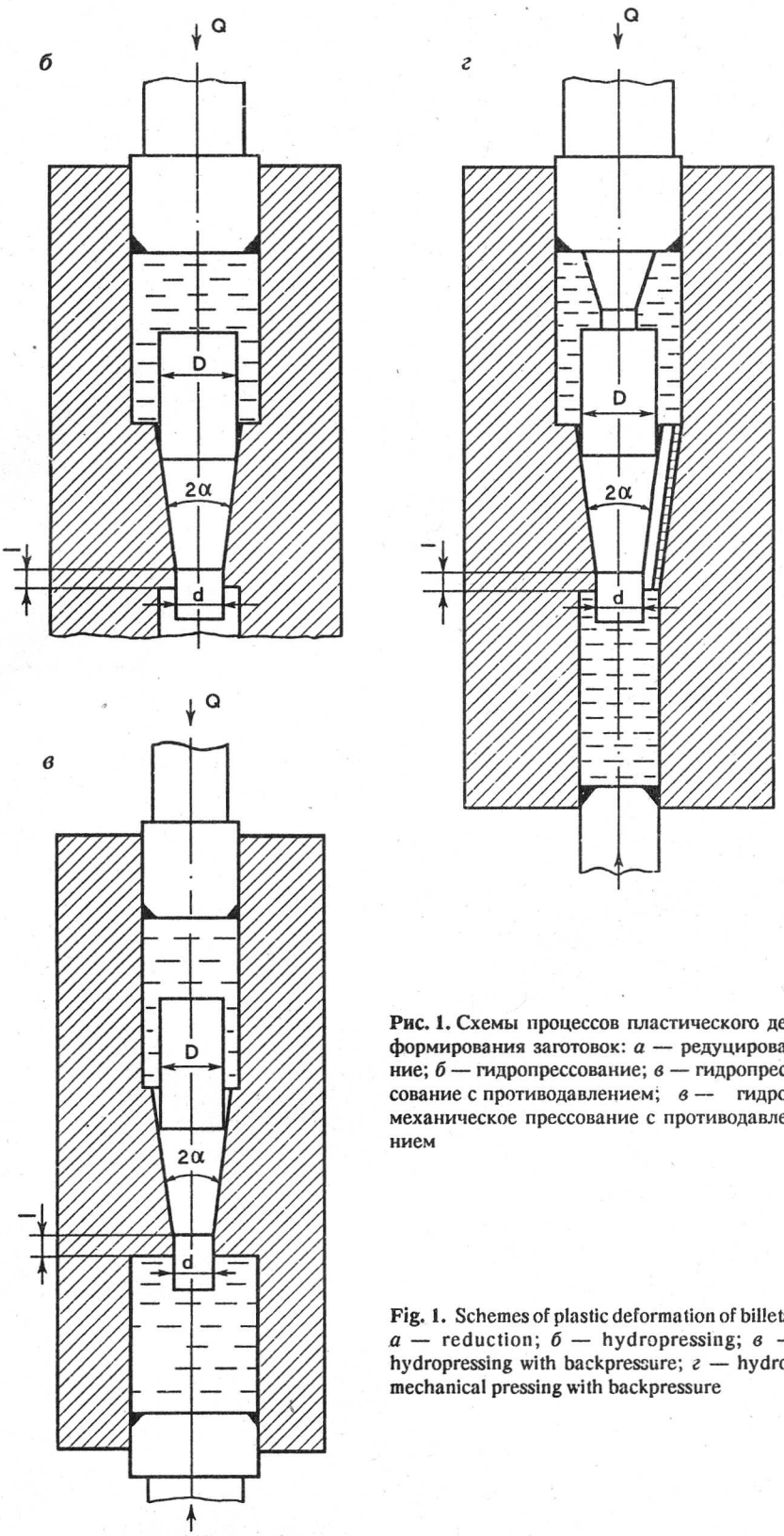


Рис. 1. Схемы процессов пластического деформирования заготовок: *а* — редуцирование; *б* — гидропрессование; *в* — гидропрессование с противодавлением; *в* — гидромеханическое прессование с противодавлением

Fig. 1. Schemes of plastic deformation of billets: *а* — reduction; *б* — hydropressing; *в* — hydropressing with backpressure; *г* — hydromechanical pressing with backpressure

d = 26 мм, высотой 5 мм. Деформирование осуществлялось на гидравлическом прессе модели ДО437 усилием 5 МН при скорости ползуна порядка 1,25 мм/с. Шероховатость поверхности образцов до и после деформации исследовалась при помощи профилографа-профилометра и на инструментальном микроскопе. Сравнение силовых параметров процессов производилось по удельному усилию, прикладываемому к заготовке. При редуцировании усилие деформирования F относилось к площади поперечного сечения заготовки S_a, при гидростатическом прессовании удельное усилие q принималось равным отношению усилия F к площади отверстия контейнера S_k, при гидромеханическом прессовании

$$q = \frac{F - P_1(S_k - S_a)}{S_a},$$

где P_1 — давление жидкости в рабочей камере.

В устройстве для гидромеханического прессования рабочая камера и камера противодавления сообщалось, поэтому с допускаемой погрешностью давление жидкости в рабочей камере P_1 принималось равным величине противодавления P_2 [1]. Величина противодавления определялась в предварительных экспериментах по усилию выдавливания рабочей жидкости из камеры противодавления через дроссель. Во всех экспериментах не учитывались потери на трение уплотнительного элемента плунжера высокого давления о стенки контейнера. Чтобы обеспечить примерно одинаковые условия экспериментов при редуцировании заготовок, использовались те же контейнер и плунжер с уплотнительным элементом, что и при гидропрессовании.

Зависимости удельного условия деформирования от стенки деформации $\left(e = \ln R = 2 \ln \frac{d_0}{d}\right)$ образцов из стали 40Х различными методами при угле конической воронки матрицы $2\alpha = 10°$ представлены на рис. 2. Минимальный силовой режим обеспечивался при гидростатическом прессовании заготовок (кривая *1*). Удельные усилия редуцирования (кривая *2*) выше на 23 ... 37%, что

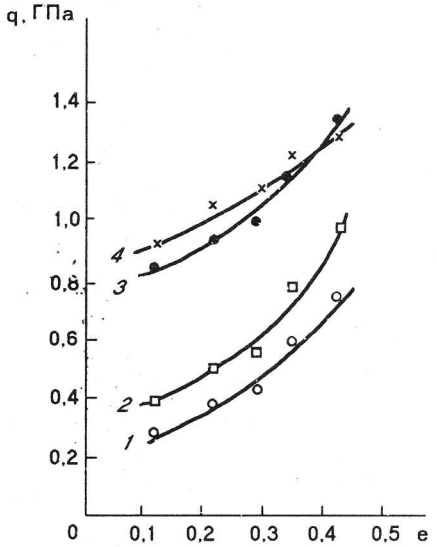


Рис. 2. Зависимость удельного усилия деформирования от степени деформации образцов: *1* — гидропрессование, *2* — редуцирование, *3* — гидропрессование с противодавлением при P_2 = 0,6 ГПа, *4* — гидромеханическое прессование с противодавлением при P_2 = 0,5 ГПа

Fig. 2. Dependence of deformation specific force on the degree of deformation of samples: *1* — hydropressing, *2* — reduction, *3* — hydropressing with backpressure at P_2 = 0.6 GPa, *4* — hydromechanical pressing with backpressure at P_2 = 0.5 GPa

обьясняется большими потерями на трение. В случае гидростатического прессования образцов с противодавлением $P_2 = 0{,}6$ ГПа удельные усилия выше, чем при гидропрессовании без противодавления, на $\Delta q = 0{,}56...0{,}61$ ГПа (кривая *3*). Прирост давления в рабочей камере обычно меньше величины противодавления P_2 в связи с улучшением условий смазки в очаге деформации. В данном случае величина Δq примерно примерно соответствует P_2 . Несколько больший, чем следовало ожидать, прирост удельного усилия гидропрессования с противодавлением связан, по-видимому, со значительным повышением вязкости рабочей жидкости. Об этом свидетельствует и тот факт, что прирост Δq увеличивается с повышением рабочего давления. Близкие значения удельного усилия зафиксированы при гидромеханическом прессовании с противодавлением $P_2 = 0{,}5$ ГПа (кривая *4*).

В результате применения цинко-фосфатного покрытия и омыливания исходных заготовок при малых степенях деформации обеспечен достаточно эффективный смазочный слой, а удельные усилия гидромеханического прессования с противодавлением и редуцирования различались на величину противодавления. С увеличением степени деформации заготовок, а следовательно, и контактных давлений, потери на трение возрастали более интенсивно при редуцировании, чем при гидромеханическом прессовании, и различие удельных усилий сократилось при $R = 1{,}534$ до $\Delta q = 0{,}31$ МПа. Меньшие потери на трение при гидромеханическом прессовании обусловлены влиянием жидкости высокого давления.

Следует отметить также, что в области больших деформаций ($e > 0{,}4$) удельные усилия гидромеханического прессования возрастают с увеличением степени деформации образцов менее интенсивно и по сравнению с удельными усилиями гидростатического прессования с противодавлением (см. рис. 2). Связано этом с тем, что в первом случае давление жидкости остается постоянным на заданном уровне, а при гидростатическом прессовании давление жидкости в рабочей камере все более повышается и потери на трение в самой жидкости возрастают. Другими словами, с точки зрения обеспечения меньших нагрузок на инструмент при больших степенях деформации заготовок более целесообразно применять метод гидромеханического прессования.

Методом идентификации теоретических и экспериментальных значений удельного усилия оценивали значения коэффициента трения при различных методах деформирования. Удельные усилия редуцирования заготовок определялись выражением [2]:

$$\frac{q}{\sigma_s} = R^{\frac{\mu \ln R}{\alpha}}\left[1 + \frac{\alpha}{\mu \ln R} + \frac{4l\mu}{d} + \ln\frac{\alpha}{\sin\alpha}\right] - 1 - \frac{\alpha}{\mu \ln R} + \\ + \ln\frac{\alpha}{\sin\alpha} + \mu \operatorname{ctg}\alpha(1 - 1/\sqrt{R})\left[R^{\frac{\mu \ln R}{\alpha}}\left(1 + \frac{\alpha}{\mu \ln R} + \frac{4l\mu}{d} + \right.\right. \\ \left.\left. + \ln\frac{\alpha}{\sin\alpha}\right) - \frac{\alpha}{\mu \ln R} + \frac{1}{\sqrt{R}}\left(1 + \frac{4l\mu}{d} + \ln\frac{\alpha}{\sin\alpha}\right)\right], \qquad (1)$$

а удельные усилия гидромеханического прессования с противодавлением — выражением, полученным в [3] на основе работы [2]:

$$\frac{q}{\sigma_s} = \frac{F}{F_1}\left[R^{\mu/\alpha}\left(1 + \frac{4l\mu}{d} + \ln\frac{\alpha}{\sin\alpha} + \frac{\alpha}{\mu}\right) + \mu \operatorname{ctg}\alpha \ln R + \right.$$

$$+\ln\frac{\alpha}{\sin\alpha}+\frac{4l\mu}{d}-\frac{\alpha}{\mu}-1\Bigg]+\frac{P_2}{\sigma_s}\left\{\frac{F}{F_1}\left[R^{\mu/\alpha}\left(1+\frac{4l\nu\mu}{d(1-\nu)}\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{R-1}{R}\mu\operatorname{ctg}\alpha+\frac{4l\nu\mu}{d(1-\nu)}-1\right]+1\right\} \qquad (2)$$

при значениях $\sigma_s = 0{,}63\ldots0{,}70$ ГПа. Полученные этим методом значения коэффициента трения приведены в таблице .

Таблица. Значение коэффициентов трения μ и коэффициента контактирования заготовки с инструментом n при различных методах деформирования

Метод деформирования	$R = 1{,}127$		$R = 1{,}331$		$R = 1{,}534$	
	μ	n	μ	n	μ	n
Редуцирование	0,199	0,521	0,095	0,584	0,102	0,755
Гидромеханическое прессование с противодавлением $P_2 = 0{,}25$ ГПа	0,014	0,426	0,015	0,316	0,013	0,360
Гидромеханическое прессование с противодавлением $P_2 = 0{,}5$ ГПа	0,013	0,316	0,013	0,272	0,013	0,337
Гидростатическое прессование	0,100	0,343	0,073	0,416	0,099	0,509
Гидростатическое прессование с противодавлением $P_2 = 0{,}6$ ГПа	0,062	0,250	0,060	0,340	0,063	0,411

Величины $\mu = 0{,}1$ при редуцировании и $\mu = 0{,}013\ldots0{,}015$ при гидромеханическом прессовании заготовок с противодавлением соответствуют известным представлениям о потерях на трение при рассматриваемых методах деформирования.

Для сравнения проведена оценка коэффициента трения при гидростатическом прессовании и гидростатическом прессовании с противодавлением с использованием выражения [4]:

$$\frac{q}{\sigma_s}=\ln R\,(1+\mu\operatorname{ctg}\alpha)+1{,}56\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}+4\mu\frac{l}{d}+$$

$$+\frac{P_2}{\sigma_s}\left(1+\mu\frac{R-1}{R}\operatorname{ctg}\alpha+4\mu\frac{l}{d}\frac{\nu}{1-\nu}\right). \qquad (3)$$

Полученные значения, равные $\mu = 0{,}073\ldots0{,}100$ для гидростатического прессования и $\mu = 0{,}060\ldots0{,}063$ для гидростатического прессования с противодавлением (см. таблицу), свидетельствуют о завышенной оценке усилия при использовании выражения (3), поскольку потери на трение при гидропрессовании вряд ли могут характеризоваться столь большим значением коэффициента μ .

Оценка эффективности смазочного слоя осуществлялась также на основании анализа шероховатости поверхности деформированных изделий. Коэф-

фициент экранирования заготовок в процессе деформации оценивался по соотношению высоты гребешков — следов токарной обработки — на исходных H_0 и прессованных H_1 образцах в виде

$$K_э = \frac{H_1}{H_0}\sqrt{R}.$$

Поскольку при гидродинамическом режиме трения высота микронеровностей изделия зависит только от коэффициента вытяжки R и определяется [5] как

$$H_1 = \frac{H_0}{\sqrt{R}},$$

а в режиме граничного трения $H_1 = 0$, то величина коэффициента экранирования принимает значения $0 \le K_э \le 1$. В таком виде коэффициент экранирования $K_э$ дает представление об относительной эффективности смазочного слоя при различных условиях прессования заготовок, в том числе с различными коэффициентами вытяжек. Такая оценка представляется более удобной по сравнению с предложенной в работе [5] в виде

$$K_э = \frac{H_0}{H_0 - H_1},$$

при которой $K_э \ge 1$, а критические значения $K_э$ (для случая гидродинамического режима трения) зависят от коэффициента вытяжки заготовок, что затрудняет общее сопоставление.

Зависимости коэффициента экранирования от степени деформации заготовок при различных методах гидропрессования и редуцировании представлены на рис. 3. Результаты исследования $K_э$ и удельных усилий деформирования заготовок находятся в хорошем согласии. При всех методах прессования с использованием жидкости высокого давления обеспечивалось значительно лучшее разделение обрабатываемого материала и инструмента, определены более высокие значения $K_э$, чем при редуцировании, причем в случае гидростатического (кривая *3*) и гидромеханического (кривая *4*) прессований с противодавлением результаты лучше, чем без противодавления (кривая *1*). Экспериментальные результаты соответствуют известным представлениям об

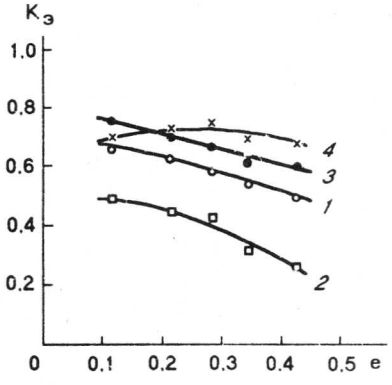


Рис. 3. Изменение коэффициента экранирования образцов в зависимости от степени деформации при различных методах гидропрессования и редуцировании: *1* — гидропрессование; *2* — редуцирование; *3* — гидропрессование с противодавлением; *4* — гидромеханическое прессование с противодавлением

Fig. 3. Change of the screening factor of samples depending on deformation degree at various hydropressing and reduction methods: *1* — hydropressing; *2* — reduction; *3* — hydropressing with backpressure; *4* — hydromechanical pressing with backpressure

участии жидкости высокого давления в формировании эффективного смазочного слоя.

Относительная площадь фактического контакта заготовки с инструментом может оцениваться коэффициентом $n = 1 + K_э$. Сопоставление коэффициентов μ и n свидетельствует о том, что более точные сведения об эффективности смазочного слоя получены на основе анализа экспериментальных данных о состоянии шероховатости поверхности исходных и деформированных заготовок. Как уже отмечалось выше, значения коэффициента трения, получаемые методом идентификации теоретической модели с экспериментом, зависят от того, насколько точным является теоретическое выражение для усилия деформирования. При этом результат оценки μ существенно зависит и от точности определения σ_s, а последнее рассчитывается довольно приближенно, обычно как среднее из значений для исходного и деформированного материала. При использовании же данных о шероховатости заготовок процедура оценки n является достаточно простой.

Выводы

1. Методика оценки коэффициента экранирования заготовок (либо коэффициента относительного контакта заготовки с инструментом) является простой и удобной для сравнения эффективности смазочного слоя при различных методах прессования.

2. Сравнительный анализ условий деформирования заготовок различными методами показал преимущества метода гидромеханического прессования заготовок с противодавлением (по сравнению с гидростатическим) при больших степенях деформации, что связано с меньшими потерями на трение в рабочей жидкости.

V. Z. Spuskanyuk, I. M. Kovalenko, Ya. E. Beigelzimer, A. A. Milanin

ESTIMATIOM OF LUBRICATION-LAYER EFFICIENCY AT DIFFERENT METHODS OF HYDROPRESSING AND REDUCING OF BILLETS

Values of the friction factor have been estimated by identifying theoretical and experimental values of specific force at reduction, hydropressing, hydropressing with backpressure and hydromechanical pressing with backpressure. The efficiency of lubrication layer has been also investigated basing on the analysis of roughness of the deformed-arbicle surfaces. It has been shown that the method of estimation of billet screening factor is the most simple and convenient to compare the lubrication-layer efficiency at various methods of deformation.

1. *А.с.* 1423241 (СССР). Устройство для гидромеханического прессования с противодавлением.— В. З. Спусканюк, И. М. Коваленко, В. П. Алексеев и др.— Опубл. 88 — Бюл. № 34.
2. *В. Я. Шехтер*, КШП 8, 5 (1967).
3. *И. М. Коваленко, В. З. Спусканюк*, Физика и техника высоких давлений 32, 67 (1989).
4. *Б. И. Береснев, В. А. Богданов, В. З. Спусканюк и др.*, Физика и техника высоких давлений 16, 80 (1984).
5. *В. И. Сцепура, Н. И. Осейко и др.*, КШП 2, 16 (1979).