

УДК 621.7.011

Петров П. А.
Воронков В. И.
Шайхулов М. В.
Петров М. А.
Назарова О. А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (ОЦЕНКА) МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В ОМД

Эффективность применения процессов обработки металлов давлением при повышенных температурах в значительной степени зависит от правильного выбора технологических смазок, способствующих снижению показателя трения (коэффициента трения либо фактора трения) и уменьшению износа штампа. Подбор технологической смазки выполняется, как правило, по величине показателя трения. В качестве показателя трения рассматривается коэффициент трения либо фактор трения, что определяется уравнением, описывающим граничные контактные условия, т. е. законом трения либо математической моделью контактного трения [1–3].

Среди наиболее доступных в реализации экспериментально-аналитических методов оценки контактного трения можно выделить следующие методы: метод осадки кольцевого образца [4], метод выдавливания двухстороннего стакана [5], метод комбинированного прямого и обратного выдавливания [6], метод выдавливания в полость неограниченной длины [7] и метод выдавливания Т-образного образца [8].

Целью данной статьи является сравнительный анализ простейших экспериментально-аналитических методов оценки показателя трения и определения их области применения. В качестве критерия, выбранного для сравнения методов, выступает значение контактного давления на поверхности контакта деформируемого образца с инструментом.

Для достижения поставленной цели проведено компьютерное моделирование формоизменения образца при выполнении простейших методов оценки показателя трения. Моделирование выполнено с применением системы «QForm», основанной на методе конечных элементов. Рассмотрены нижеследующие методы:

- метод осадки кольцевого образца (рис. 1, а);
- метод выдавливания Т-образного образца (рис. 1, б);
- метод выдавливания двухстороннего стакана (рис. 2, а);
- метод комбинированного прямого и обратного выдавливания (рис. 2, б).

Размеры образцов принимались в соответствии с рекомендациями, приведенными в каждом из рассматриваемых методов [4–6, 8]. В табл. 1 представлены размеры исходных образцов для выполнения математического моделирования испытаний.

Таблица 1

Размеры образцов для проведения моделирования

Метод испытания	Размеры образца, мм							
	H_0	$D_{\text{внеш}}$	$d_{\text{вн}}$	L_0	$D_{\text{контейнера}}$	D_p	$D_{\text{отв. матриц}}$	$S_{\text{конт.п.}}, \text{мм}^2$
осадка кольцевого образца	9,5	28,5	14,25					478,455
выдавливание Т-образного образца		7,0		7,0				153,938
выдавливание двухстороннего стакана		26,9		27,0	26,9	19,4		478,486
комбинированное прямое и обратное выдавливание		26,9		50,0	26,9	26,9	19,4	478,486

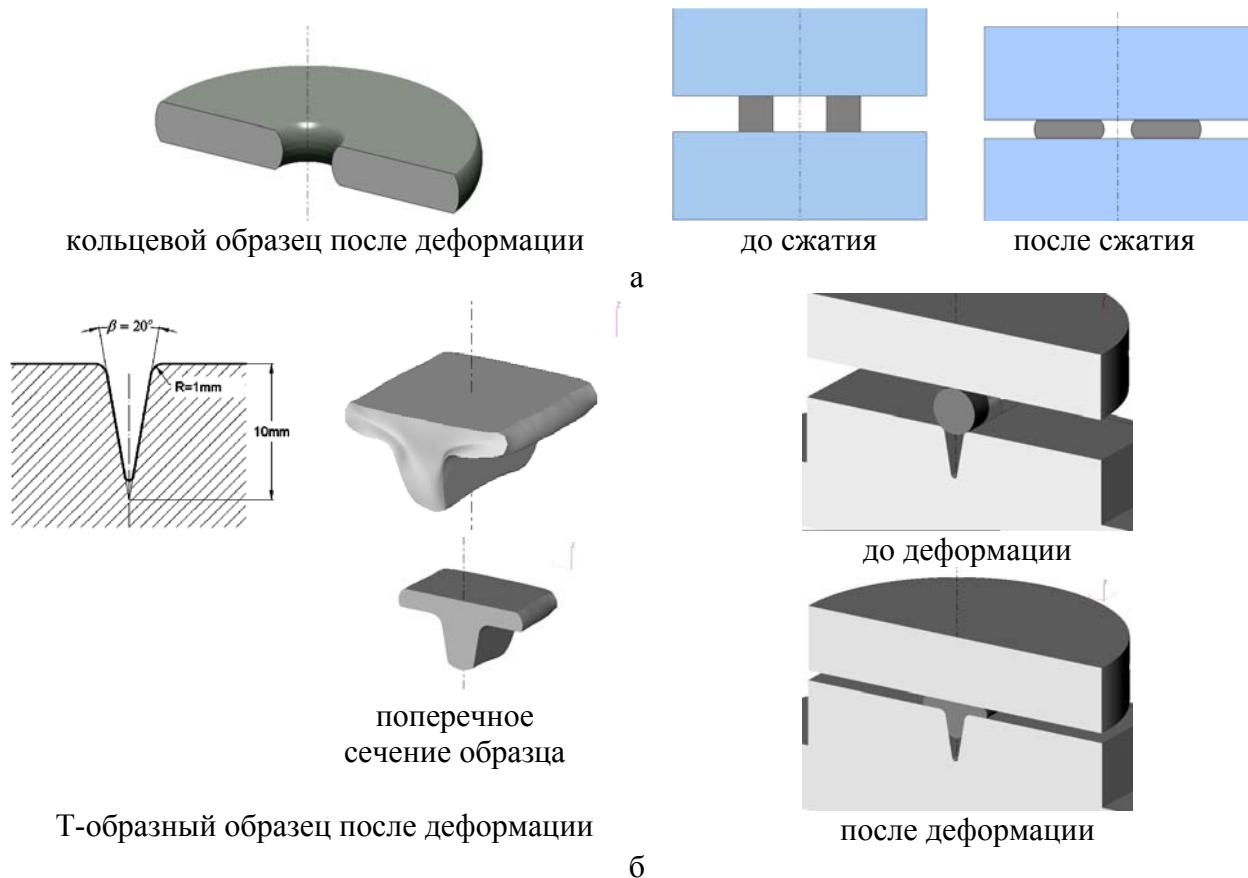


Рис. 1. Схемы реализации экспериментально-аналитических методов оценки контактного трения, основанные на сжатии-выдавливании:

а – метод осадки кольцевого образца; б – метод выдавливания Т-образного образца

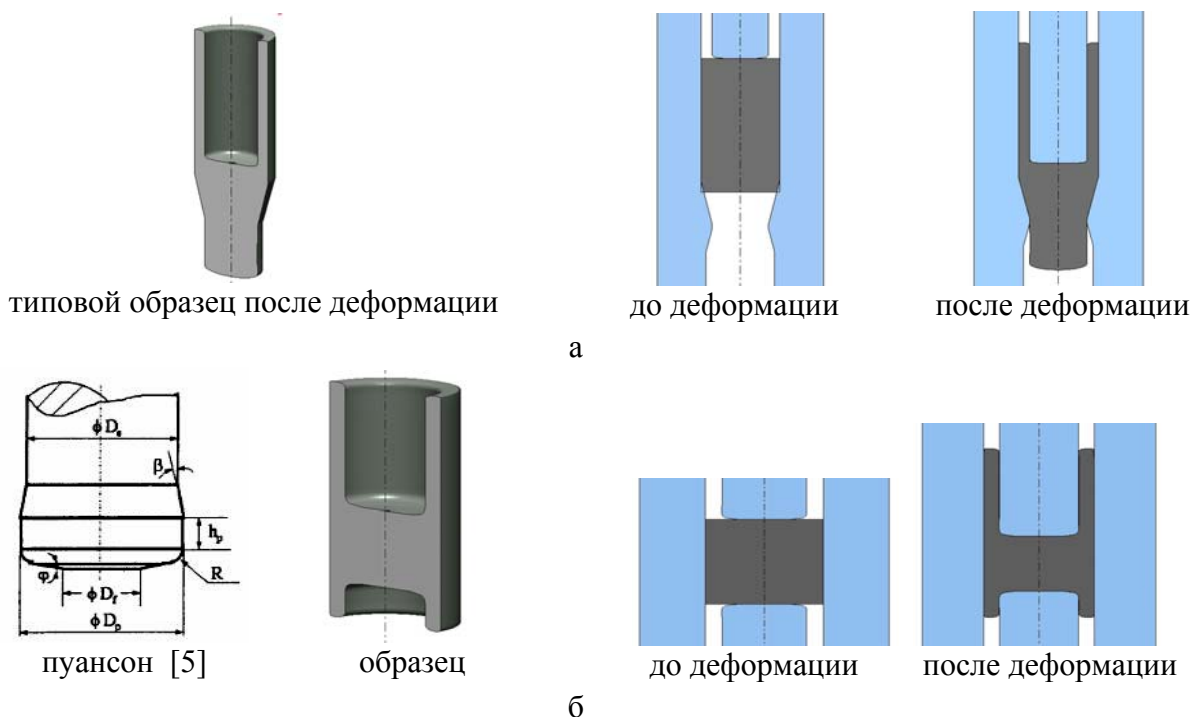


Рис. 2. Схемы реализации экспериментально-аналитических методов оценки контактного трения, основанные на выдавливании материала:

а – метод комбинированного прямого и обратного выдавливания; б – метод выдавливания двухстороннего стакана

Параметр $S_{\text{конт.п}}$ (см. табл. 1) определяет площадь контактной поверхности в начальный момент деформирования. При выдавливании Т-образного образца этот параметр определяется как площадь боковой поверхности исходного образца. В остальных случаях $S_{\text{конт.п}}$ соответствует площади контакта с верхним инструментом.

В качестве исходных данных для моделирования принимали:

– материал образца, вне зависимости от моделируемого метода – алюминиевый сплав АК4-1 [9];

– температура нагрева образца и инструмента – 430 °С;

– фактор трения – постоянный и равный 0,8;

– скорость перемещения верхнего инструмента – 2 мм/с;

– относительная степень деформации:

1) при осадке кольцевого образца: по высоте – 0,5;

2) при выдавливании двухстороннего стакана: по высоте/диаметру – 0,5/0,52;

3) при прямом-обратном выдавливании (см. рис. 2, а): по диаметру – 0,52;

4) при выдавливании Т-образного образца: по высоте – 0,5.

Здесь под фактором трения понимается коэффициент пропорциональности в модели трения, предложенной А.Н. Левановым [3], которая применяется в системе «QForm» для задания граничных контактных условий.

Результаты компьютерного моделирования сравниваемых методов оценки показателя трения, представлены на рис. 3–6. Анализ результатов позволяет говорить о следующем:

1) метод осадки кольцевого образца обеспечивает невысокий уровень контактного давления $q_{\text{конт}}$; максимум контактного давления $q_{\text{конт.макс}}$ определяется положением границы раздела течения; изменение внутреннего диаметра образца зависит от значения показателя трения;

2) метод выдавливания Т-образного образца обеспечивает более высокий уровень контактного давления $q_{\text{конт}}$ по сравнению с методом осадки кольцевого образца; данный метод характеризуется наличием неоднородности течения материала вдоль оси образца (см. рис. 4, а); изменение фактора трения от нулевого значения до 0,8 приводит к тому, что больше материала выдавливается на плоскость, а не в V-образный паз в инструменте;

3) метод выдавливания двухстороннего стакана обеспечивает наибольший уровень контактного давления на обоих инструментах; метод характеризуется хорошей чувствительностью к изменению граничных контактных условий; увеличение фактора трения приводит к формированию вертикальных стенок разной высоты;

4) метод комбинированного выдавливания занимает промежуточное положение между методом осадки кольцевого образца и методом выдавливания двухстороннего стакана по уровню контактного давления; условия контактного трения в контейнере (матрице) и на пуансоне различны, что затрудняет однозначное определение показателя трения по результатам данного испытания.

Метод выдавливания двухстороннего стакана и комбинированного выдавливания нашли применение для оценки качества технологических смазок для холодной штамповки. Н. Бей [10] показал, что сочетание метода осадки кольцевого образца и метода выдавливания двухстороннего стакана позволяет получить более полные данные о контактном трении при изучении новых смазок для холодной штамповки. С другой стороны, Г. Шен [11] показал, что в случае изотермической штамповки алюминиевых сплавов метод осадки кольцевого образца дает хорошие результаты при низком контактном давлении; при высоком контактном давлении метод обратного выдавливания (backward extrusion-type forging) позволяет достичь точных результатов в количественной оценке трения.

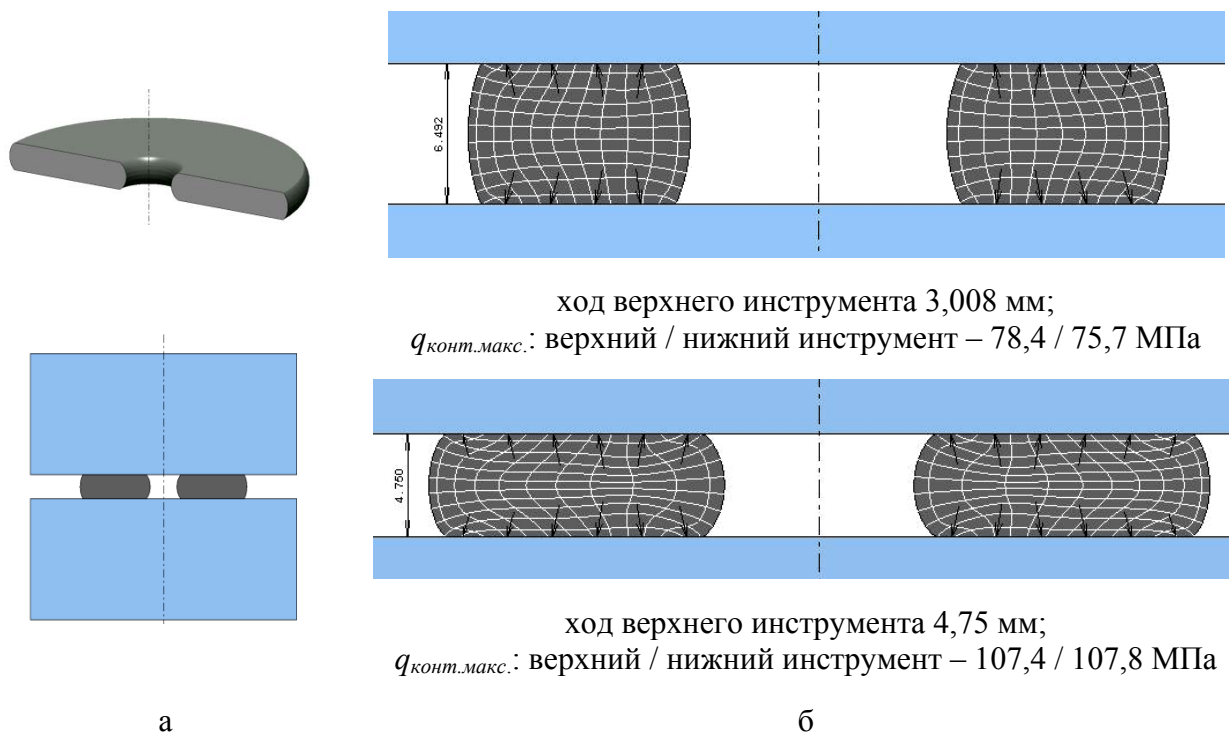


Рис. 3. Моделирование осадки кольцевого образца:
 а – схема осадки; б – распределение контактного давления

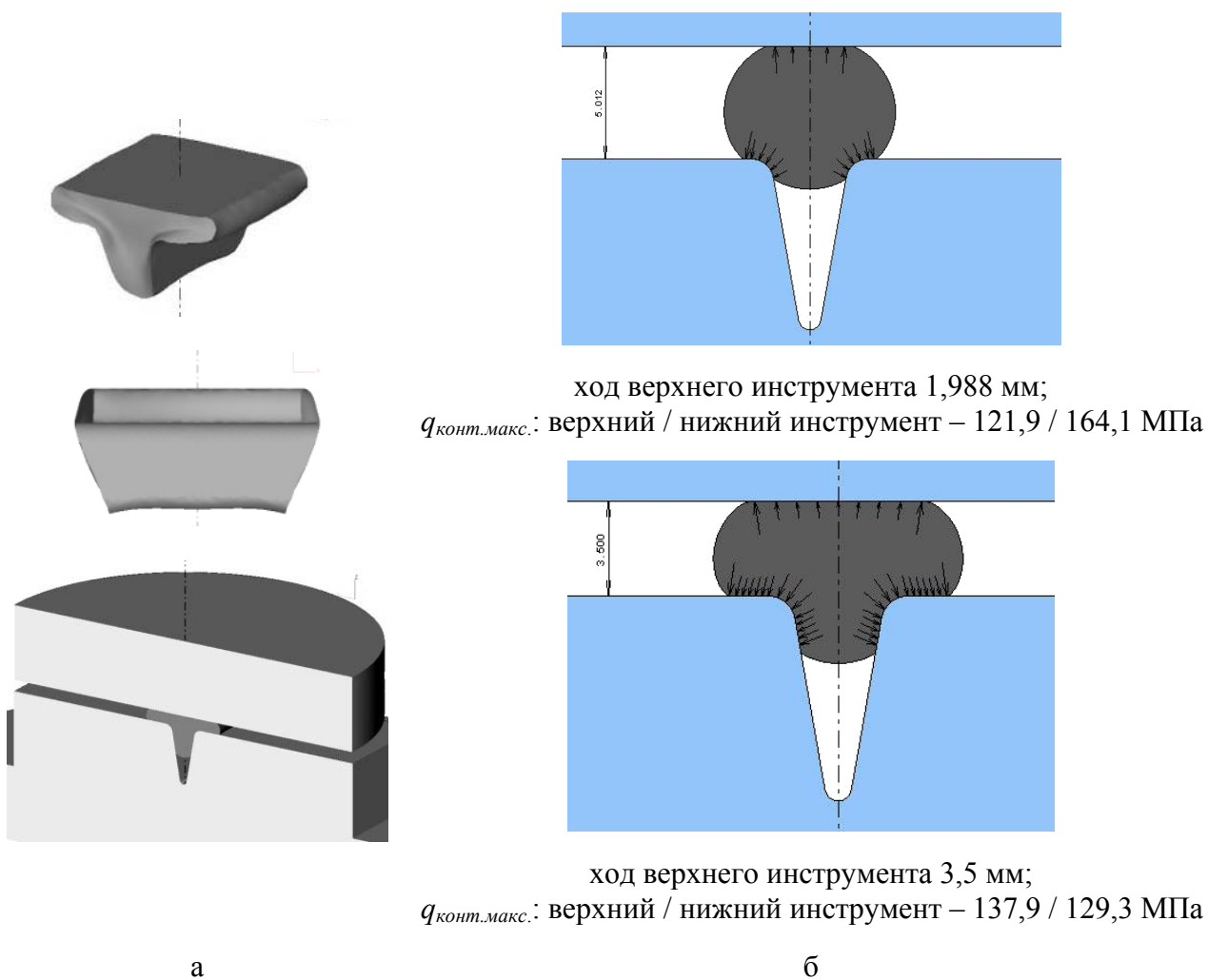


Рис. 4. Моделирование выдавливания Т-образного образца:
 а – схема выдавливания; б – распределение контактного давления

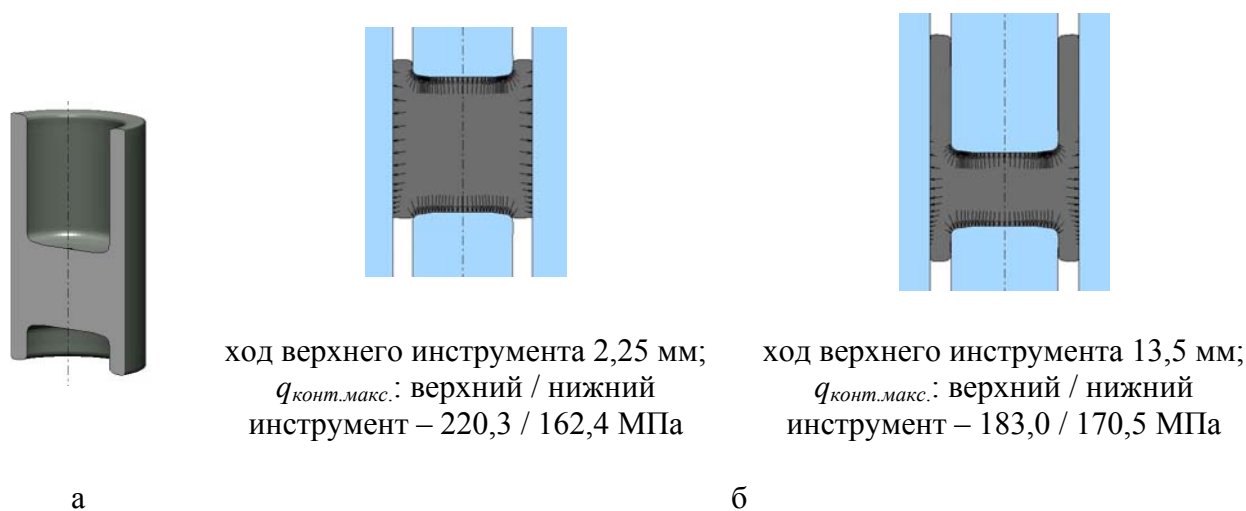


Рис. 5. Моделирование выдавливания двухстороннего стакана:
 а – схема выдавливания; б – распределение контактного давления

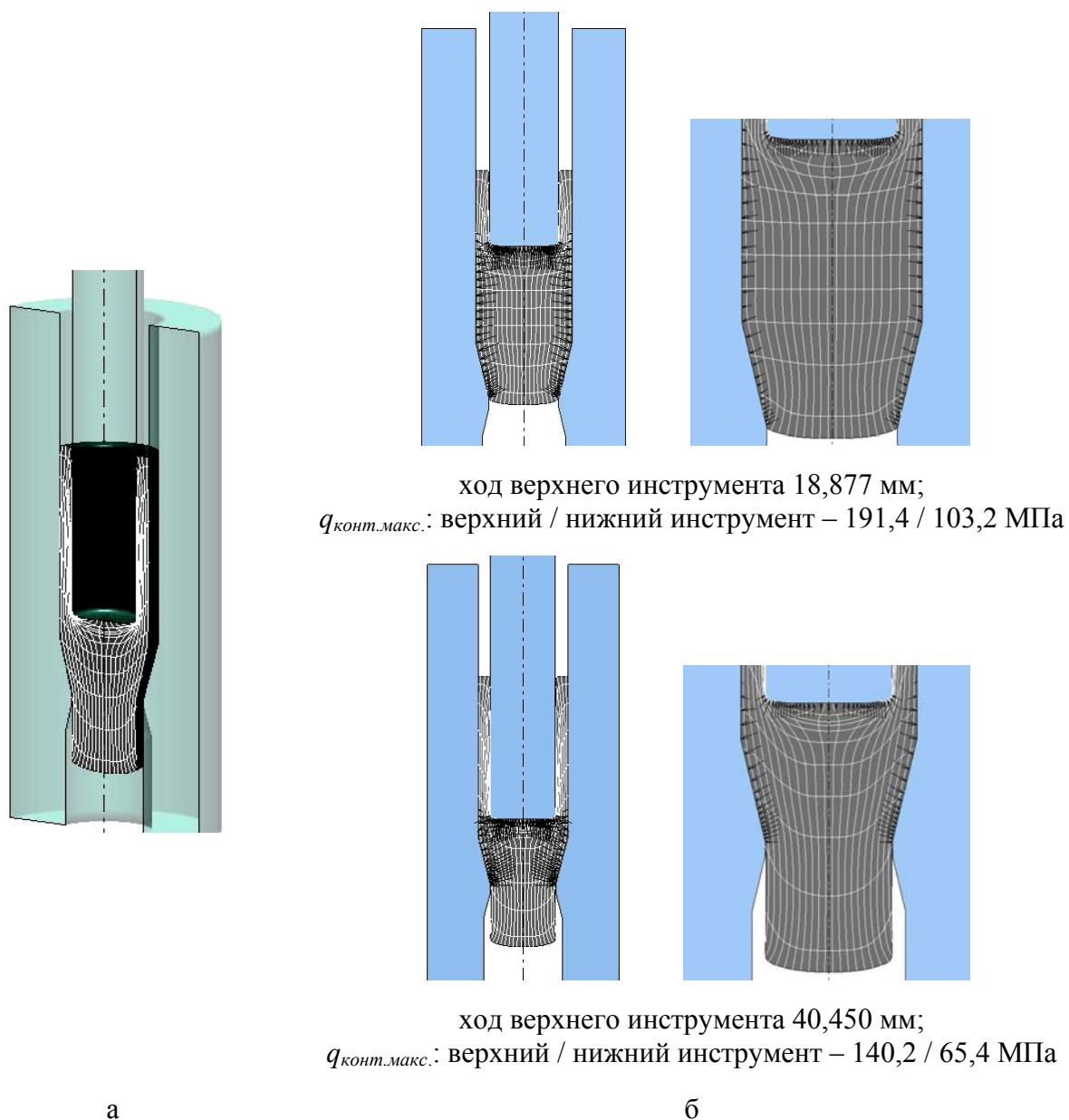


Рис. 6. Моделирование комбинированного прямого и обратного выдавливания:
 а – схема выдавливания; б – распределение контактного давления

Сопоставим полученные результаты с одним из типовых технологическим процессом горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов в открытом штампе. На рис. 7 представлены результаты математического моделирования технологического процесса горячей штамповки алюминиевого сплава АК4-1 в открытом штампе. Штамповка выполняется на гидравлическом прессе номинальной силой 2,5 МН и скоростью траверсы 2 мм/с.

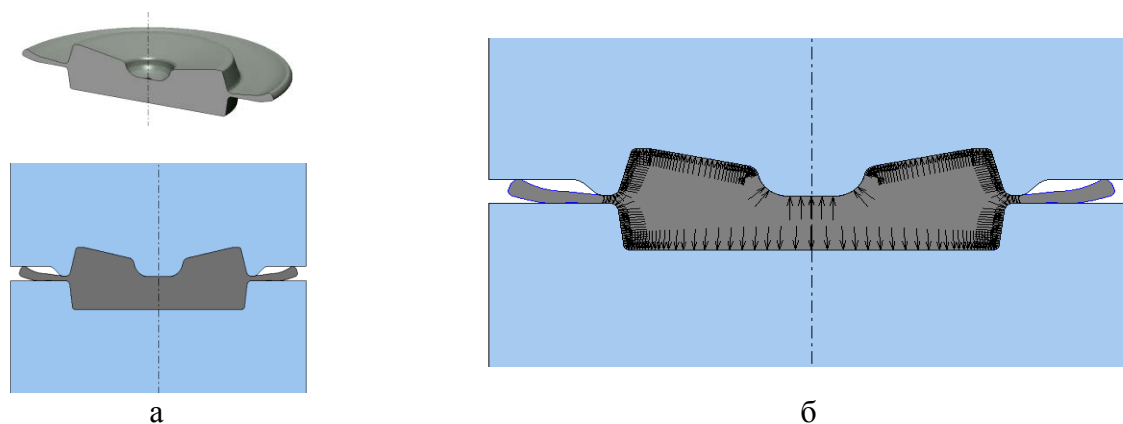


Рис. 7. Штамповка поковки детали «Заборник» в открытом штампе:

а – схема штамповки; б – распределение контактного давления в конце рабочего хода траверсы: $q_{\text{конт.макс.}}$: верхний / нижний инструмент – 372,9 / 324,5 МПа

Сравнение результатов моделирования технологического процесса штамповки (рис. 8) с результатами, полученными при моделировании простейших методов оценки контактного трения (см. рис. 3–6) показывает, что в значение фактора трения, определенное методом осадки кольцевого образца может быть применено в случае штамповки в открытом штампе только до значения относительной деформации 25 %. При больших значениях деформации распределение контактного давления на формообразующей поверхности верхнего и нижнего инструмента различно и превышает значение контактного давления, достигаемого в случае осадки кольцевого образца стандартного размера, т. е. с отношением размеров 6:3:2. При заполнении полостей ручья штампа выдавливанием, наблюдается увеличение контактного давления (см. рис. 8). Значение $q_{\text{конт.}}$ оказывается сопоставимо со значением контактного давления, создаваемым при выдавливании двухстороннего стакана (см. рис. 5, б), либо превышает это значение.

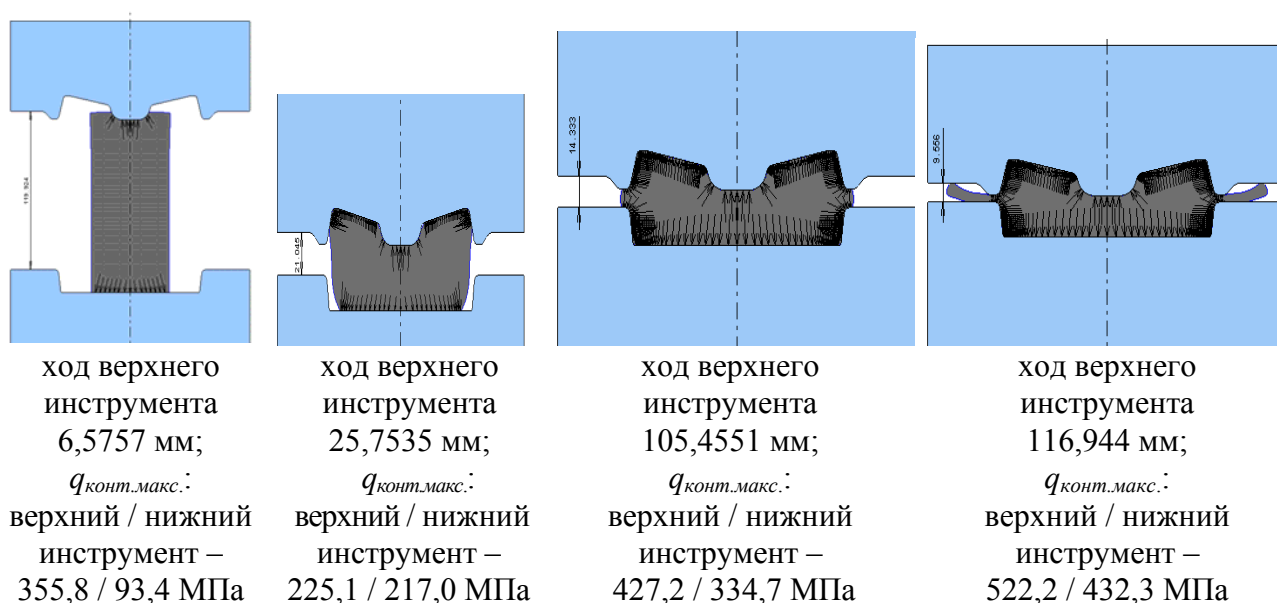


Рис. 8. Стадии выполнения штамповки

ВЫВОДЫ

Проведен сравнительный анализ простейших экспериментально-аналитических методов оценки показателя трения. На основе математического моделирования в системе «QForm» определены преимущества и недостатки методов, а также область их возможного применения. Вывод, сделанный Н. Беём [10] в отношении возможного сочетания метода осадки кольцевого образца с методом выдавливания двухстороннего стакана при холодной деформации, оказывается справедливым и в случае рассмотрения типового технологического процесса горячей штамповки алюминиевого сплава в открытом штампе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А. И. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А. И. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Машиностроение, 1982. – 312 с.
2. Wanheim T. A Theoretically Determined Model for Friction in Metal Working Processes / T. Wanheim, N. Bay, A. S. Petersen // *Wear*. – 1974. – № 28. – P. 251–258.
3. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин, Б. П. Картак, Ю. В. Ашур, Ю. И. Спасский. – М. : Металлургия, 1976. – 416 с.
4. Male A. T. Method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation / A. T. Male, M. G. Cockcroft // *J. Instit. Metals*. – 1964. – V. 93. – P. 38–46.
5. Geiger R. Der Stofffluss beim kombinierten Napffliesspressen Metal flow in combined can extrusion) / R. Geiger // *Berichte aus dem Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart nr. 36, Verlag W. Girardet, Essen. – Germany, 1976. – 197 p.*
6. Sanchez L. R. A friction test for extrusion based on combined forward and backward flow, T. Altan (Ed.) / L. R. Sanchez, K. J. Weinmann, J. M. Story // *Proc. the 13 th North American Manufacturing Research Conference, May 1985, Society of Manufacturing Engineers. – Dearborn, MI. – P. 110–117.*
7. Petty D. M. Friction models for finite element modeling / D. M. Petty // *J. Mater. Proc. Technol.* – 1994. – № 45. – P. 7–12.
8. Zhang Q. Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test / Q. Zhang, E. Felder, Bruschi. // *J. Mat. Proc. Technol.* – 2009. – № 209. – P. 5720–5729.
9. Микляев П. Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях их обработки давлением : справ. изд. / П. Г. Микляев. – М. : Металлургия, 1994. – 288 с.
10. A new lubricant carrier for metal forming / M. Arentoft, N. Bay, P. T. Tang, J. D. Jensen // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2009. – № 58. – P. 243–246.
11. A method for evaluating friction using a backward extrusion-type forging / G. Shen, A. Vedhanayagam, E. Kropp, T. Altan // *J. Mat. Proc. Technol.* – 1992. – № 33. – P. 109–123.

Петров П. А. – канд. техн. наук, доц. МГТУ «МАМИ»;
Воронков В. И. – аспирант МГТУ «МАМИ»;
Шайхулов М. В. – аспирант МГТУ «МАМИ»;
Петров М. А. – канд. техн. наук, ассистент МГТУ «МАМИ»;
Назарова О. А. – магистр МГТУ «МАМИ».

МГТУ «МАМИ» – Московский государственный технический университет «МАМИ», г. Москва, Россия.

E-mail: petrov_p@mail.ru