

Результаты измерений

Тип погрешности	Отклонения, полученные в результате измерений, мкм		Допустимые отклонения по ГОСТ 1643-81, мкм	
	$S_z = 0,04$ мм/зуб	$S_z = 0,8$ мм/зуб	6 ст.	8 ст.
Погрешность профиля зуба	15,3	31,8	16	32
Суммарная погрешность контактной линии	18,6	34,5	25	45
Отклонение шага	$\pm 8,3$	$\pm 22,1$	± 18	± 36
Накопленная погрешность шага	28,2	28,2	63	125

Результаты измерений позволяют сделать вывод о том, что при работе с подачей $S_z = 0,04$ мм/зуб полученные отклонения соответствуют 6 степени точности по ГОСТ 1643-81, а при подаче $S_z = 0,8$ мм/зуб – 8 степени точности.

Таким образом, теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность достижения 6 степени точности (ГОСТ 1643-81) зубчатых колес при чистовой обработке на станках с ЧПУ дисковым инструментом с прямолинейными режущими кромками.

Анализ методов исследования контактного трения, основанных на выдавливании деформируемого материала

к.т.н. доц. Петров П.А., Воронков В.И., к.т.н. Петров М.А., Назарова О.А., Шайхулов М.В.
МГТУ «МАМИ», ОАО «СМК»
p.petrov@mami.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования контактного трения, возникающего в процессе выдавливания деформируемого материала.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, выдавливание деформируемого материала, контактное трение

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 [1-3].

Среди наиболее доступных в реализации экспериментально-аналитических методов оценки контактного трения можно выделить следующие методы, основанные на выдавливании деформируемого материала: метод выдавливания двухстороннего стакана [4], метод комбинированного прямого и обратного выдавливания [5], метод выдавливания в полость неограниченной длины [6] и метод выдавливания Т-образного образца [7]. Предложенный в 2009 г. Джанг К. метод выдавливания Т-образного образца считается универсальным методом исследования и оценки контактного трения, учитывающим особенности течения материала на свободной поверхности инструмента и в закрытых формообразующих полостях инструмента [7].

Целью данной статьи является сравнительный анализ экспериментально-аналитических методов оценки показателя трения, основанных на выдавливании деформируемого материала, а также определение области их применения. В качестве критерия, выбранного для сравнения методов, выступает значение контактного давления на поверхности контакта дефор-

мируемого 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.

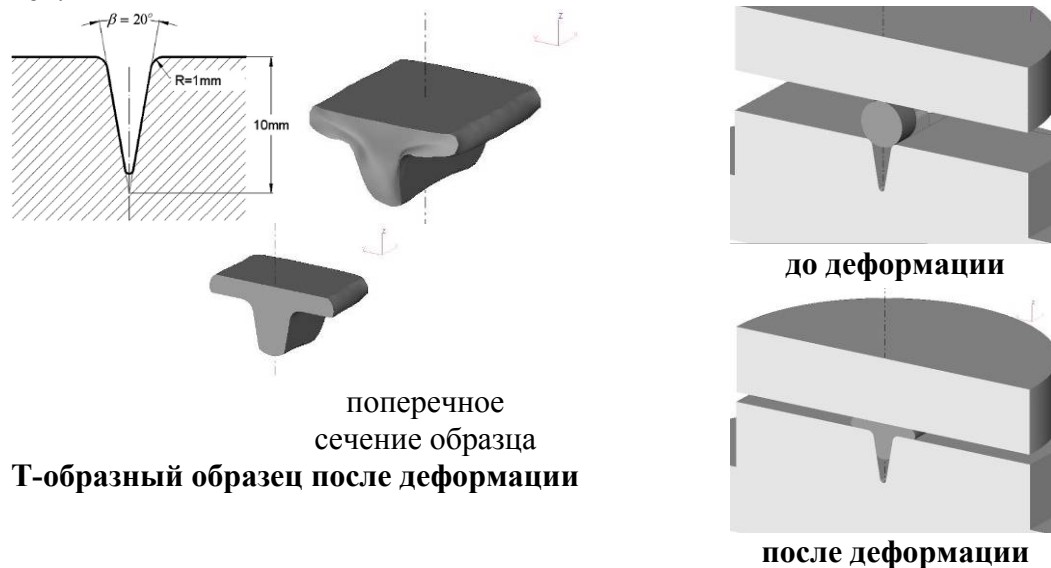


Рисунок 1 – Схемы реализации экспериментально-аналитических методов оценки контактного трения, основанных на сжатии-выдавливании

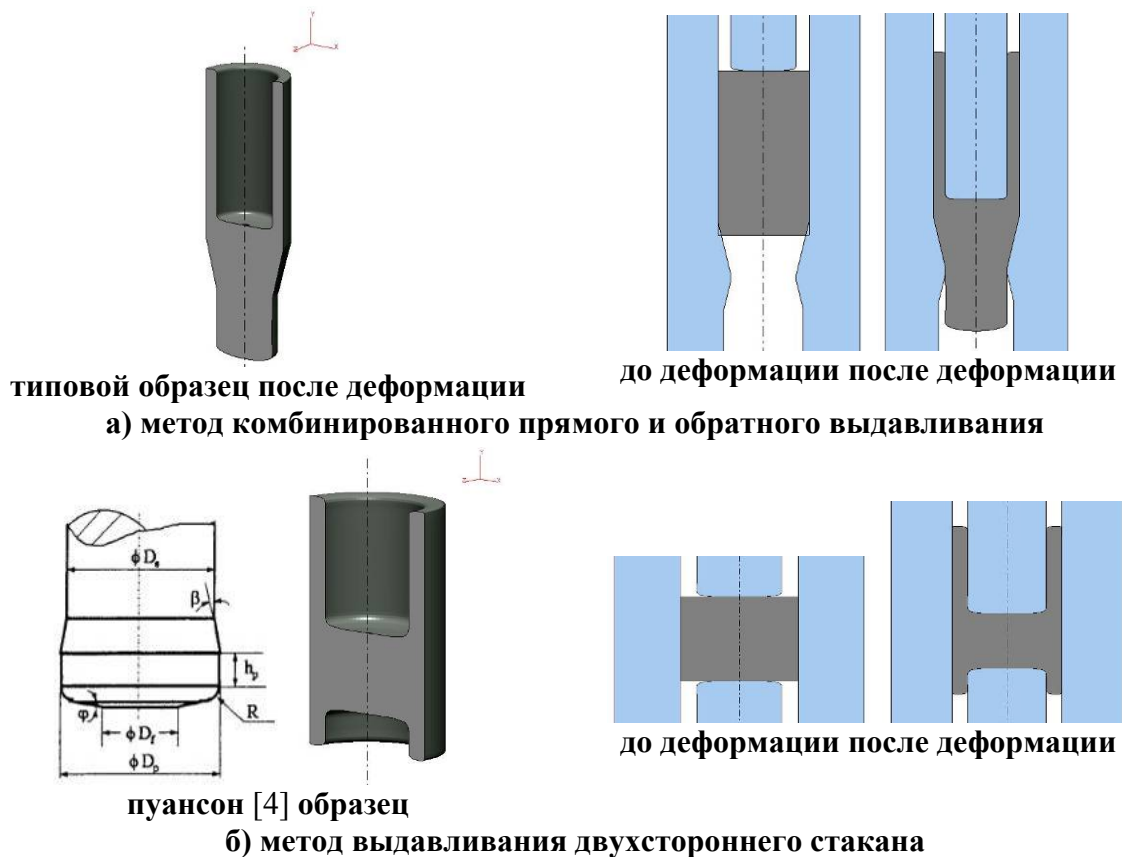


Рисунок 2 – Схемы реализации экспериментально-аналитических методов оценки контактного трения, основанных на выдавливании материала

Рассмотрены следующие методы:

- метод выдавливания Т-образного образца (рисунок 1);

- метод выдавливания двухстороннего стакана (рисунок 2а);
- метод комбинированного прямого и обратного выдавливания (рисунок 2б).

Размеры образцов принимались в соответствии с рекомендациями, приведенными в каждом из рассматриваемых методов [4, 5, 7]. В таблице 1 представлены размеры исходных образцов для выполнения математического моделирования испытаний.

Параметр $S_{\text{конт.п}}$ (таблица 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 проведения испытаний – алюминиевый сплав АК4-1; «изотермическая» кривая текучести построена в соответствии с методикой, представленной в работе [8];
- 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 выдавливании Т-образного образца: по высоте – 0,5;
 - 2) при выдавливании двухстороннего стакана: по высоте/диаметру – 0,5/0,52;
 - 3) при прямом-обратном выдавливании (см. рисунок 2а): по диаметру – 0,52.

Таблица 1

Размеры образцов для проведения моделирования

Метод испытания	Размеры образца, мм						
	$D_{\text{внеш}}$	$d_{\text{вн}}$	L_0	$D_{\text{контейнера}}$	D_p	$D_{\text{отв.матрица}}$	$S_{\text{конт.п.}}, \text{мм}^2$
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

Под фактором трения понимается коэффициент пропорциональности в модели трения, предложенной А.Н.Левановым [3]. Эта модель применяется в системе QFORM для задания граничных контактных условий:

$$\tau_k = k_n (1 - \exp(-1,25(\sigma_n / \sigma_{\text{Т.К.}}))) \frac{\sigma_{\text{Т.К.}}}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где: τ_k - контактное касательное напряжение; k_n – фактор трения; σ_n – нормальное напряжение на контактной поверхности; $\sigma_{\text{Т.К.}}$ – предел текучести приконтактного слоя.

Результаты компьютерного моделирования сравниваемых методов оценки показателя трения представлены на рисунках 3-5.

Анализ результатов позволяет говорить о следующем:

1. метод выдавливания Т-образного образца обеспечивает более высокий уровень контактного давления $q_{\text{конт}}$ по сравнению с методом осадки кольцевого образца; данный метод [7] характеризуется наличием неоднородности течения материала вдоль оси образца (см. рисунок 3а); изменение фактора трения от нулевого значения до значения 0,8 приводит к тому, что при прочих равных условиях больший объем деформируемого материала выдавливается на свободную поверхность инструмента, а не в V-образный паз, выполненный в инструменте;
2. метод выдавливания двухстороннего стакана обеспечивает наибольший уровень контакт-

ного давления на обоих инструментах; метод характеризуется хорошей чувствительностью к изменению граничных контактных условий; увеличение фактора трения приводит к формированию вертикальных стенок разной высоты;

3. 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.

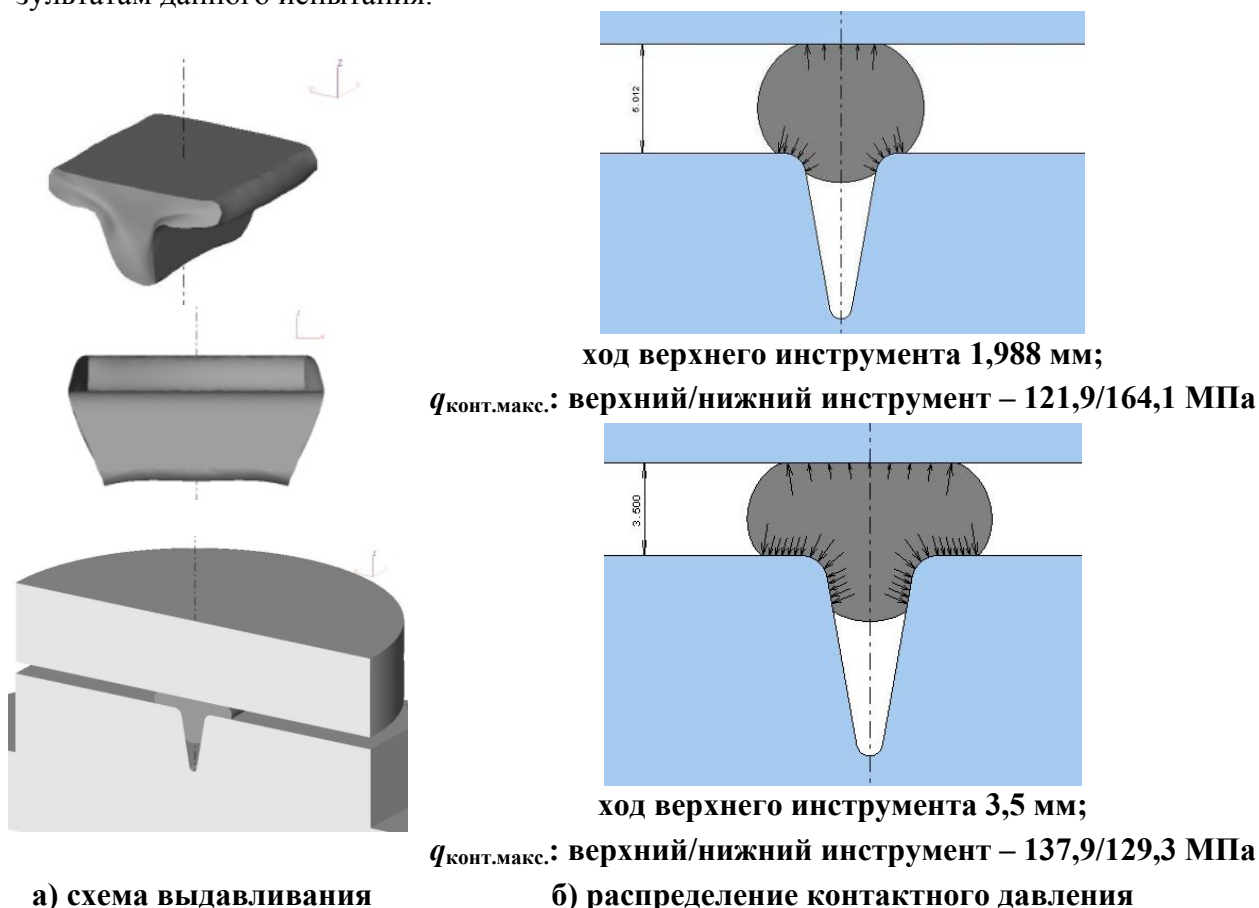


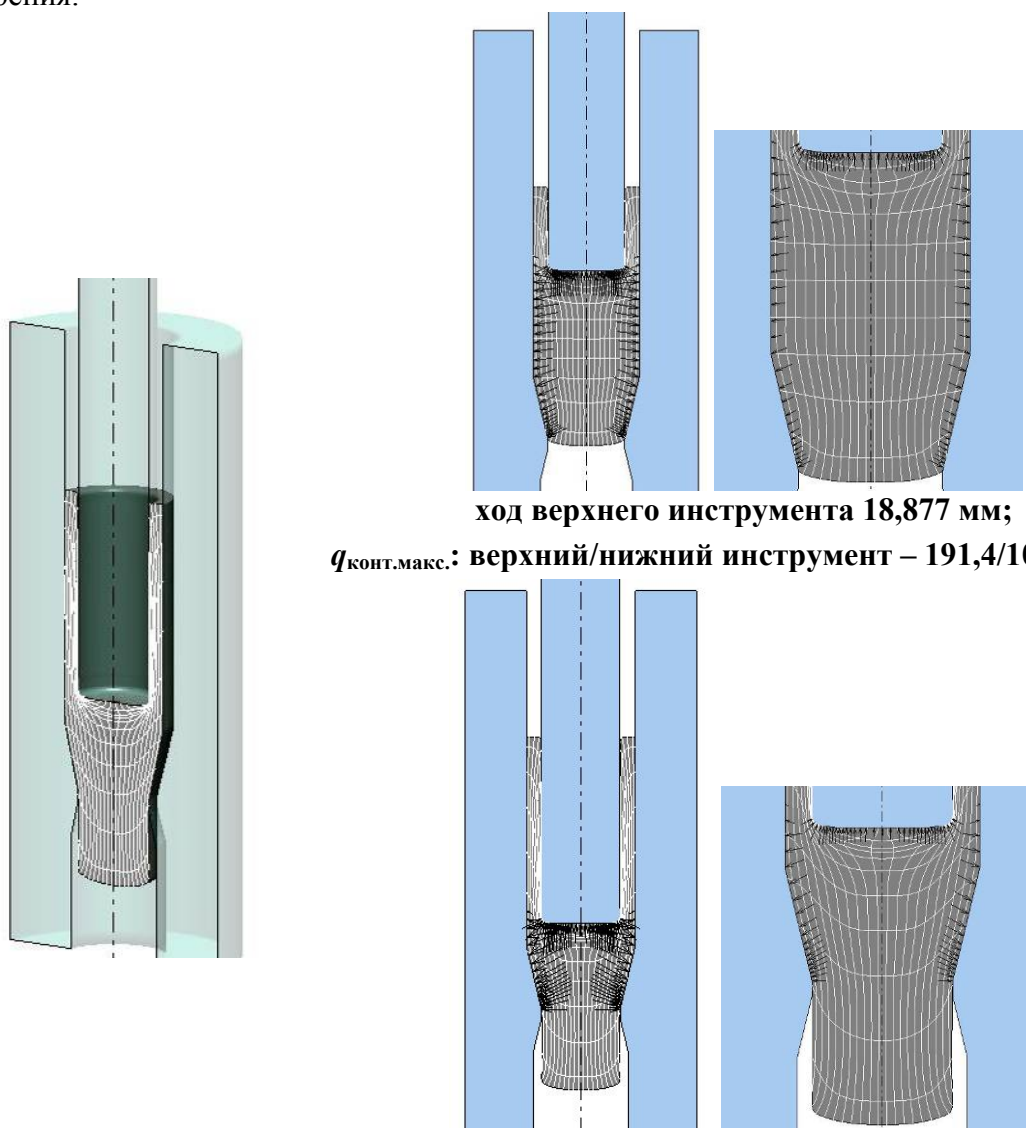
Рисунок 3 – Моделирование выдавливания Т-образного образца



Рисунок 4 – Моделирование выдавливания двухстороннего стакана

Метод выдавливания Т-образного образца требует корректировки с целью устранения (снижения) влияния неоднородности деформации на торцах образца на величину контактного трения. Методы выдавливания двухстороннего стакана и комбинированного выдавливания нашли применение для оценки качества технологических смазок для холодной штамповки. Н.Бей [9] 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. Применение двух последних методов для исследования контактного трения при температурахковки и горячей штамповки затруднительно.

С другой стороны, Г.Шен [10] 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.



ход верхнего инструмента 18,877 мм;

$q_{\text{конт.макс.}}$: верхний/нижний инструмент – 191,4/103,2 МПа

ход верхнего инструмента 40,450 мм;

$q_{\text{конт.макс.}}$: верхний/нижний инструмент – 140,2/65,4 МПа

а) схема выдавливания

б) распределение контактного давления

Рисунок 5 – Моделирование комбинированного прямого и обратного выдавливания

Сопоставим полученные результаты, связанные с распределением контактного давле-

ния по формообразующей поверхности инструмента, с распределением контактного давления при горячей объемной штамповке поковки детали «Корпус» из алюминиевого сплава в закрытом штампе. На рисунке 6 представлены результаты математического моделирования технологического процесса горячей штамповки алюминиевого сплава АК4-1 в закрытом штампе. Штамповка выполняется на гидравлическом прессе номинальной силой 2,5 МН и скоростью траверсы 2 мм/с.

Сравнение результатов моделирования¹ технологического процесса штамповки поковки детали «Корпус» (рисунок 7) с результатами, полученными при моделировании методов оценки контактного трения (см. рисунок 3-5) показывает, что значение контактного давления $q_{\text{конт.макс.}}$, создаваемого на инструменте при выдавливании Т-образного образца (см. рисунок 3б), сопоставимо с значением контактного давления, создаваемого на поверхности инструмента при штамповке (см. рисунок 7б). При значениях относительной деформации более 50 % наблюдается увеличение контактного давления (см. рисунок 7в и 7г); заполнение полостей ручья штампа происходит за счет выдавливания деформируемого материала и значение $q_{\text{конт.макс.}}$ оказывается сопоставимым со значением контактного давления, полученным при выдавливании двухстороннего стакана (см. рисунок 4б), либо превышает это значение.

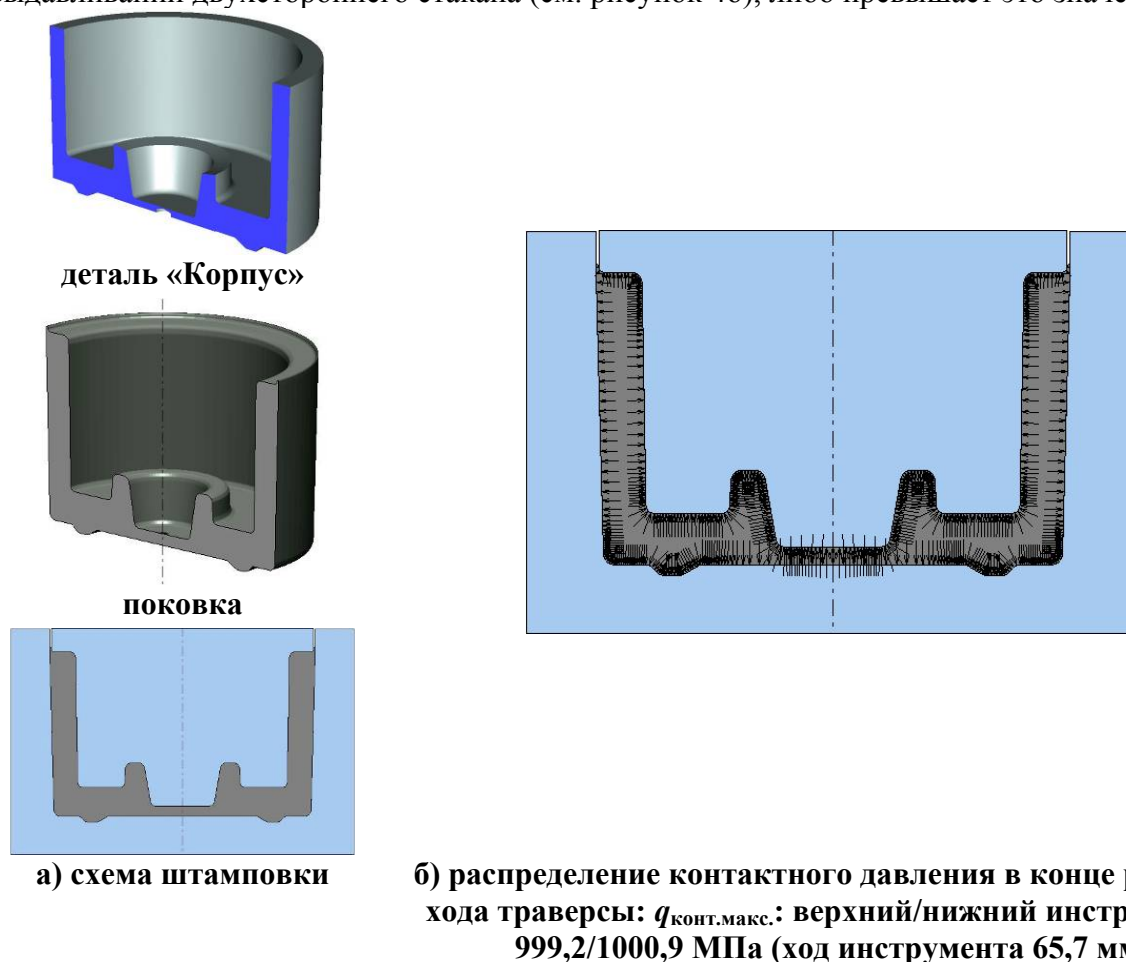


Рисунок 6 – Штамповка поковки детали «Корпус» в закрытом штампе

Выводы

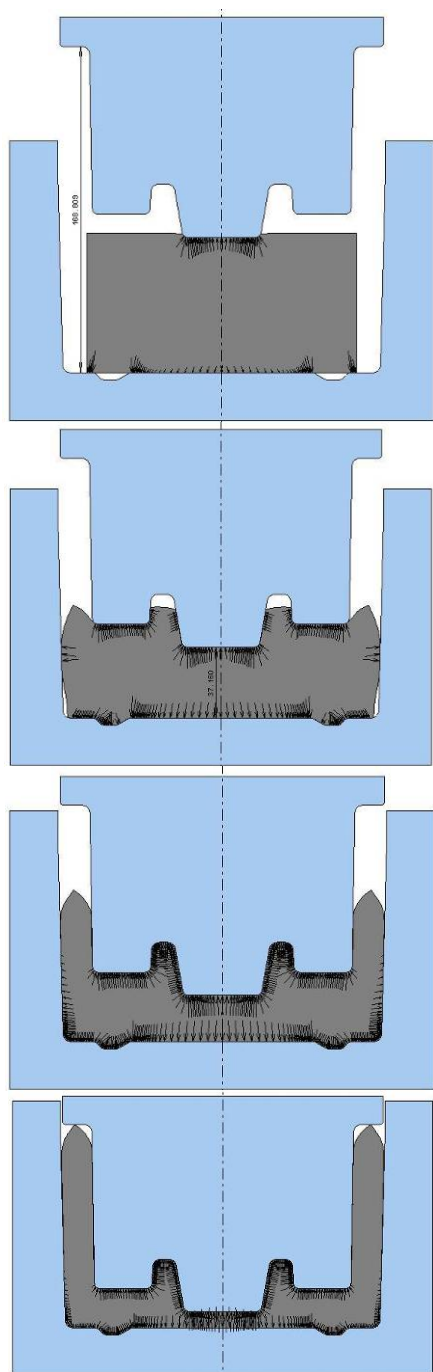
В статье проведен сравнительный анализ экспериментально-аналитических методов оценки показателя трения, основанных на выдавливании деформируемого материала. На основе математического моделирования в системе QFORM определены преимущества и недос-

¹ Компьютерное моделирование выполнено магистром техники и технологии Дубинчиным А.В. на кафедре «Кузовостроение и обработка давлением» МГТУ «МАМИ»

татки методов, а также область их возможного применения. Новый метод оценки контактного трения – метод выдавливания Т-образного образца требует корректировки.

Вывод, сделанный Н.Беем [9] в отношении возможного сочетания нескольких методов оценки контактного трения, подтверждается результатами, полученными при моделировании методов (см. рисунок 3-5) и технологического процесса штамповки в закрытом штампе (см. рисунок 7).

В рамках данной статьи часть работ, связанных с отработкой методики построения «изотермической» кривой текучести и компьютерным моделированием технологического процесса штамповки, выполнена при финансовой поддержки Министерства образования и науки РФ (ГК № 14.740.11.0584, шифр проекта 2010-1.2.2-111-017-032).



а)
 высота исходной заготовки – 72,2 мм;
 ход верхнего инструмента – 2,19 мм;
 относительная деформация по высоте – 3,03 %;
 $q_{\text{конт. макс.}}$: верхний/нижний инструмент – 142,8/45,7 МПа

б)
 ход верхнего инструмента – 35,04 мм;
 относительная деформация по высоте – 48,5 %;
 $q_{\text{конт. макс.}}$: верхний/нижний инструмент – 155,5/118,7 МПа

в)
 ход верхнего инструмента 48,18 мм;
 относительная деформация по высоте – 66,7 %;
 $q_{\text{конт. макс.}}$: верхний/нижний инструмент – 214,7/195,0 МПа

г)
 ход верхнего инструмента 63,51 мм;
 относительная деформация по высоте – 88,0 %;
 $q_{\text{конт. макс.}}$: верхний/нижний инструмент – 349,9/349,7 МПа

Рисунок 7 – Распределение контактного давления $q_{\text{конт. макс.}}$ в зависимости от хода инструмента

Литература

1. Грудев А.И., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1982, 312 с.
2. Wanheim T., Bay N., Petersen A.S. A Theoretically Determined Model for Friction in Metal Working Processes. // Wear. 28 (1974), pp. 251-258.
3. Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П., Картак Б.Р., Ашпур Ю.В., Спасский Ю.И. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1976, 416 с.
4. Geiger R. Der Stofffluss beim kombinierten Napffliesspressen (Metal flow in combined can extrusion). Berichte aus dem Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart nr.36, Verlag W. Girardet, Essen, Germany, 1976, 197 pp. (in German).
5. Sanchez L.R., Weinmann K.J., Story J.M. A friction test for extrusion based on combined forward and backward flow, T.Altan (Ed.). // Proc. the 13th North American Manufacturing Research Conference, May 1985, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, pp.110-117.
6. Petty D.M. Friction models for finite element modelling. // J. Mater.Proc.Technol., 45, 1994, pp.7-12.
7. Zhang Q., Felder E., Bruschi. Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test. // J.Mat.Proc.Technol., 209, 2009, pp.5720-5729.
8. Петров П.А. К вопросу построения «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АК4-1. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. №2 (21), 2009. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, стр. 135-140.
9. Arentoft M., Bay N., Tang P.T., Jensen J.D. A new lubricant carrier for metal forming. // CIRP Annals – Manufacturing Technology, 58, 2009, pp.243-246.
10. Shen G., Vedhanayagam A., Kropp E., Altan T. A method for evaluating friction using a backward extrusion-type forging. // J.Mat.Proc.Technol., 33, 1992, pp.109-123.

Теоретический анализ процесса электрохимического гравирования аэродинамических занижений

Саушкин Г.Б., к.т.н. доц. Моргунов Ю.А.

МГТУ «МАМИ»

morgunov56@mail.ru, тел. 8 916 376 83 56

Аннотация. Проведен теоретический анализ формирования аэродинамических занижений на основе модели идеального электрохимического формообразования. Выявлены погрешности формы, обусловленные механизмом съема материала, и показана возможность управления их значениями путем выбора параметров режима электролиза.

Ключевые слова: электрохимическое гравирование, получение аэродинамических занижений, погрешности формы, выбор параметров режима электролиза

Электрохимическое гравирование является эффективной технологией получения аэродинамических занижений на деталях газотурбинных двигателей [1]. Для обеспечения точного контура занижения процесс электрохимического травления осуществляют на малых межэлектродных зазорах или предварительно наносят на поверхность заготовки диэлектрическую маску (рисунок 1) [2, 3].

В общем виде задача электрохимического травления занижений в рамках модели идеального процесса формообразования представляется системой уравнений [4]: