

## КОНТАКТНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПРИ ОСАДКЕ ВЫСОКИХ ЗАГОТОВОК

А.Ф. Денисова

denisova.a.f@gmail.com

SPIN-код: 4898-8802

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

### Аннотация

Проанализированы результаты экспериментальных исследований кандидата технических наук (Dr.-Ing.) Gerhard Nebe по определению контактных давлений при осадке высоких заготовок методом точечных месдоз. Показано, что экспериментальные эпюры контактных давлений имеют качественные отличия от известных аналитических решений: на краю образца существуют максимумы контактных давлений. Цель исследования — выявление причин, влияющих на характер изменения нормального напряжения в высоких заготовках. Показано, что результаты конечно-элементного моделирования имеют хорошее качественное совпадение с результатами экспериментальных исследований G. Nebe. Выполнена попытка физического объяснения существования максимумов давлений на краю заготовки. Результаты исследования дополняют существующие данные о контактных давлениях при осадке высоких заготовок.

### Ключевые слова

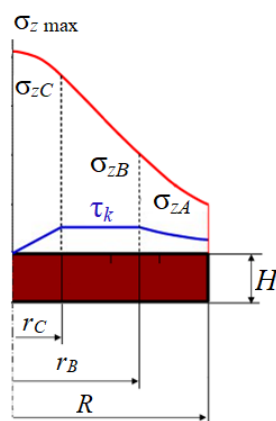
Контактное давление, осадка, нормальное напряжение, метод конечных элементов, зона трения, QFort, месдоза, контактное напряжение, высокая заготовка

Поступила в редакцию 19.11.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

**Введение.** Экспериментальные исследования, проведенные Е.П. Унксовым [1], показали, что в общем случае на контактной поверхности заготовки при осадке существует три зоны с различным характером трения. Е.П. Унксов предложил следующие названия зон: зона *A* — зона скольжения, зона *B* — зона торможения, зона *C* — зона прилипания (рис. 1).

Цилиндрические заготовки, диаметр  $D$  которых меньше удвоенной высоты  $H$  заготовки ( $D < 2H$  или  $R < H$ ), принято называть высокими (рис. 2). В таких заготовках зоны *B* и *A* отсутствуют. Согласно теоретическим расчетам, максимум контактных давлений для высоких заготовок расположен в центре.



**Рис. 1.** Эпюры нормальных и касательных контактных напряжений при осадке в общем случае [1]:

$\sigma_{zA}$ ,  $\sigma_{zB}$ ,  $\sigma_{zC}$  — контактное нормальное напряжение в зонах *A*, *B* и *C*;  $\tau_k$  — касательное напряжение;  $r_C$ ,  $r_B$  — радиусы зон *C* и *B*;  $R$  — радиус заготовки (зоны *A*);  $H$  — высота заготовки

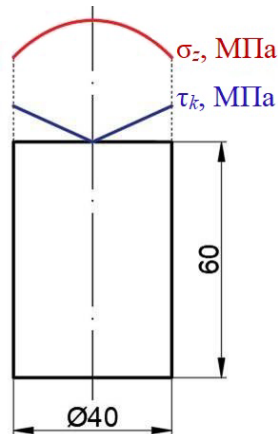


Рис. 2. Предположительная эпюра нормальных и касательных контактных напряжений высокой заготовки

В данной статье проанализированы итоги эксперимента немецкого ученого (Dr.-Ing.) Gerhard Nebe по определению напряжений при осадке высоких заготовок на контакте с инструментом методом точечных мездоз [2, 3]. Эпюры контактных давлений в высоких заготовках, полученные в процессе исследования, имеют качественные отличия от приведенных ранее теоретических эпюр — существуют максимумы контактных давлений на краю цилиндрического образца (рис. 3).

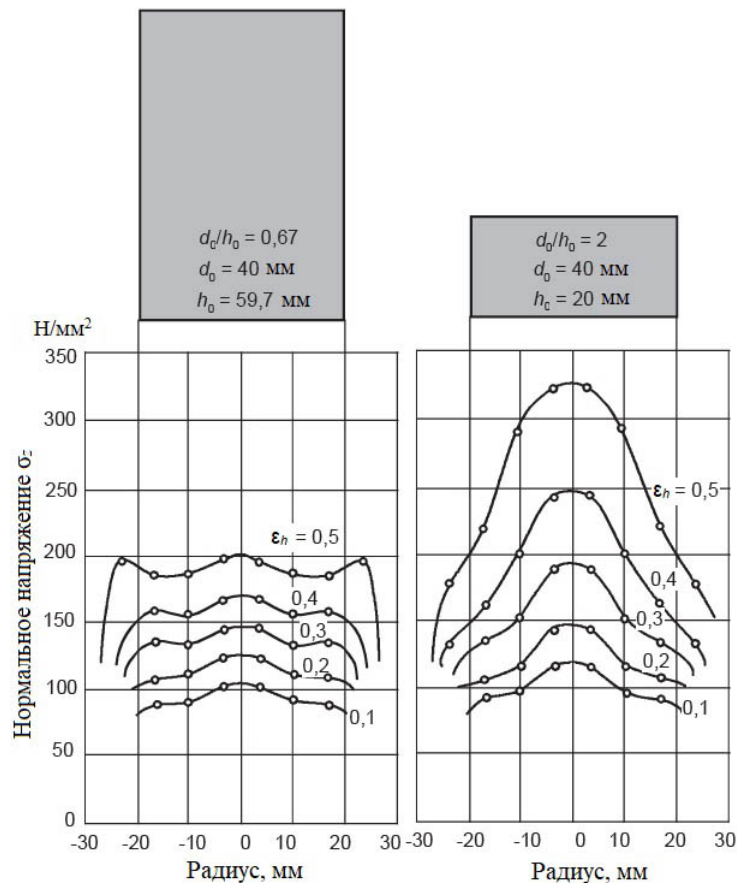


Рис. 3. Сравнение эпюр нормальных напряжений при осадке низких и высоких заготовок ученого Gerhard Nebe [2, 3]:

$\epsilon_h$  — относительная деформация по высоте;  $d_0, h_0$  — исходные диаметр и высота заготовки

В низких цилиндрических образцах характер распределения контактного давления имеет вид, схожий с эпюрами, полученными теоретическими методами.

Целью данного исследования было нахождение параметров, оказывающих влияние на характер изменения нормального давления в высоких заготовках.

Про моделирован процесс осадки высоких заготовок из технически чистого алюминия в программном обеспечении QForm. Проведено сравнение различных параметров, предположительно влияющих на вид исследуемых эпюр. Показано, что результаты моделирования методом конечных элементов хорошо совпадают качественно с результатами экспериментов, полученными G. Nebe. Произведена попытка физического объяснения наличия пиков давления на краю заготовки. Представлено сравнение теоретических эпюр, экспериментальных исследований G. Nebe, и эпюр, полученных в процессе моделирования. Результаты проделанной работы дополняют существующие знания о контактных давлениях при осадке высоких заготовок.

**Постановка задачи.** На первом этапе исследования проведено моделирование в программе QForm [4, 5] процесса осадки с параметрами, соответствовавшими экспериментальным исследованиям G. Nebe. Цилиндрический образец диаметром 40 мм и высотой 60 мм из технически чистого алюминия осаживали на 50 % на универсальном прессе со скоростью 1 мм/с. Был принят закон трения Леванова [6] с фактором трения  $m = 0,2$ , смазка — графитовода. Кривые упрочнения [7] были выбраны из стандартной базы данных QForm. При дальнейших исследованиях было выявлено, что кривая упрочнения, используемая G. Nebe, хорошо совпадает с кривыми, взятыми из базы данных (рис. 4).

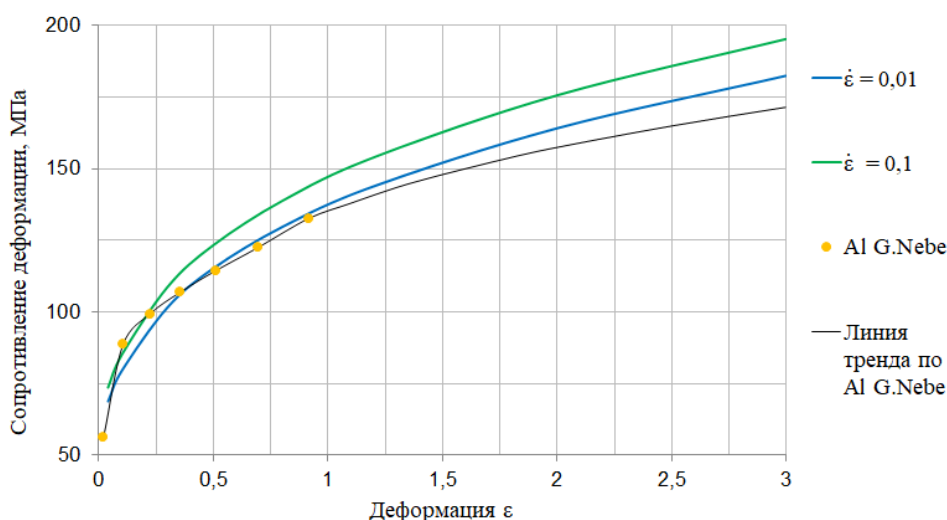


Рис. 4. Сравнение кривых упрочнения Al 99,5 из базы данных QForm и из исследования G.Nebe [2] ( $\dot{\epsilon}$  — скорость деформации,  $c^{-1}$ )

Используемая методика обработки данных заключалась в создании точек на поверхности заготовки, последующей их трассировке и создания по полученным данным графиков в MS Excel [8]. Далее эти графики сравнивали с построенными G. Nebe и анализировали причины различий.

**Варьируемые параметры.** На платформе QForm было проведено моделирование процесса осадки высоких алюминиевых заготовок в трехмерной и двумерной (осесимметричной) постановке [9] (рис. 5). При одних и тех же параметрах эпюры контактных давлений хорошо совпадают (различие не превосходит 0,02 %), из чего можно сделать вывод о том, что 2D-модель хорошо отражает характер нормальных напряжений. Поэтому в дальнейших исследованиях для сокращения времени расчета использовали осесимметричную модель.

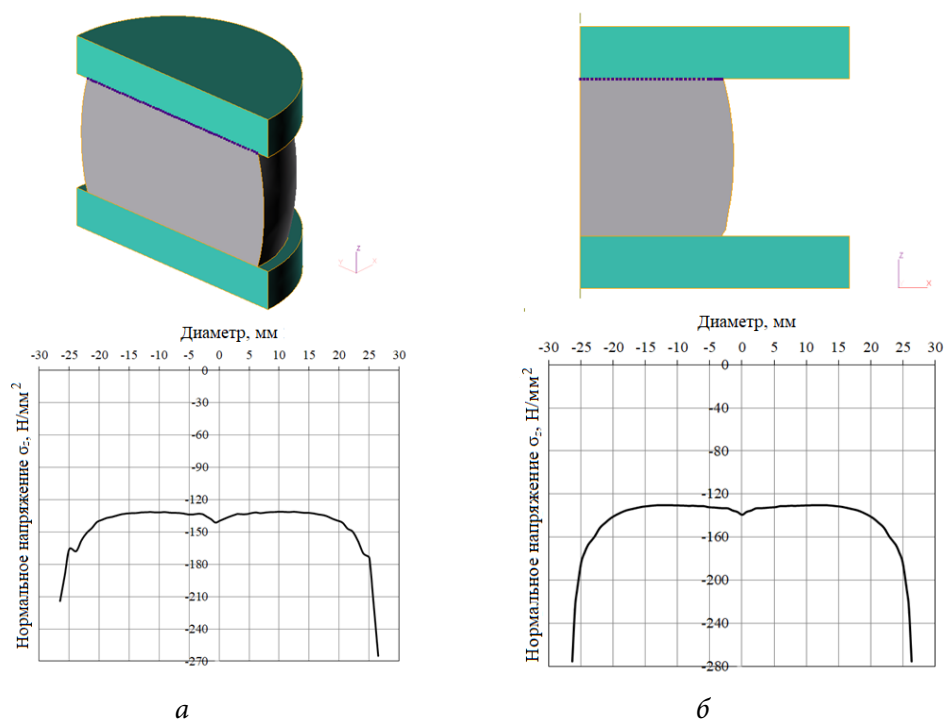


Рис. 5. Сравнение эпюр нормальных напряжений при осадке высоких заготовок:

*a* — 3D; *б* — 2D

Для обоснования модели материала выполнили сравнение результатов моделирования для упругопластической и вязкопластической модели [10] (рис. 6).

Эпюры контактных напряжений, полученные по различным моделям, практически совпадают за исключением крайних точек. Напряжение на крайних точках диаметра при упругопластической модели материала превышает значения для вязкопластической модели.

Результаты моделирования показывают, что по краям заготовки возникают пики контактных давлений, не имеющих объяснения по существующим теориям.

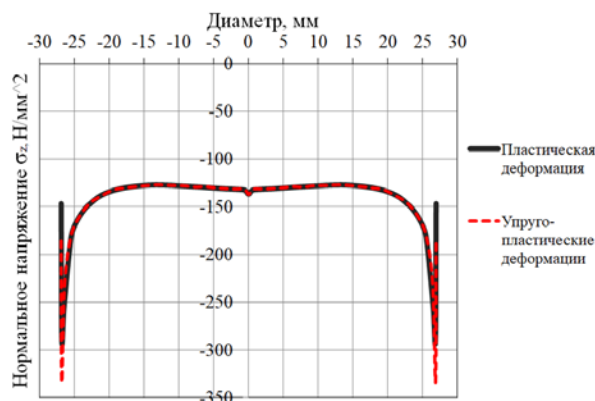


Рис. 6. Сравнение эпюр нормальных напряжений при пластической и упругопластической деформациях

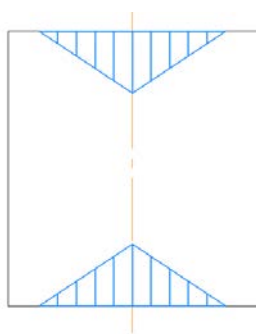


Рис. 7. Упругие зоны в цилиндрической заготовке

Как замечали Е.П. Унксов и G. Nebe, в цилиндрических заготовках существует зона (рис. 7), в которых деформации крайне малы и имеют в основном упругий характер.

На рис. 8 показана скорость пластических деформаций при осадке высокой заготовки. Близ поверхностей контакта можно заметить треугольные зоны, скорость пластических деформаций в которых близка к нулю, а значит, в данный момент эта зона деформируется упруго.

Поскольку упругопластическая модель материала более физически обоснована для холодной деформации, в дальнейших исследованиях использовали именно ее.

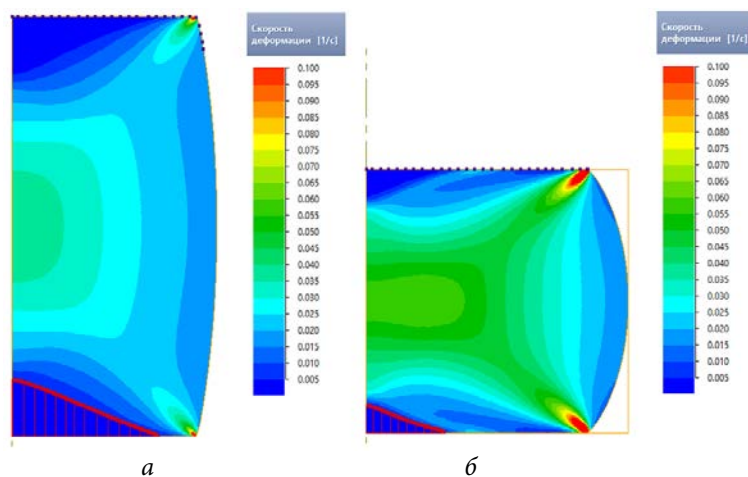
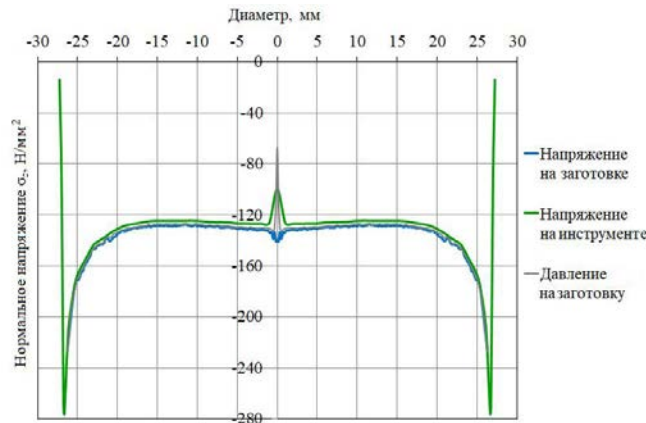


Рис. 8. Скорость деформаций в высокой заготовке при осадке:  
а — на 20 %; б — на 50 %

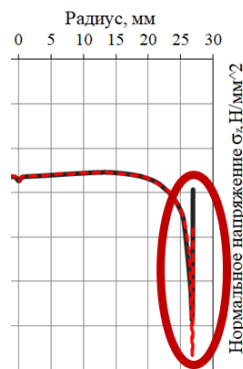
Заметим, что с увеличением отношения диаметра к высоте треугольник уменьшается.

Выполнено сравнение результатов моделирования с абсолютно жестким и с упругим инструментом. На рис. 9 видно, что характер напряжений на инструменте в обоих случаях хорошо совпадает, что позволило продолжить исследования, опираясь на жесткую модель инструмента.

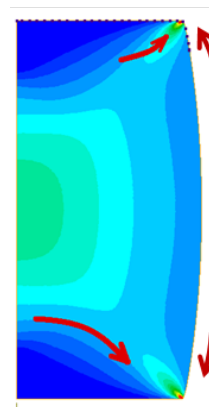


**Рис. 9.** Сравнение эпюр нормальных напряжений при упругопластической совместной деформации на заготовке и на инструменте

Объяснить скачок напряжения на диаметре заготовки (рис. 10) можно двумя причинами: дополнительными напряжениями от металла, перетекающего с боковой поверхности заготовки на поверхность инструмента и от потока металла, обтекающего упругую зону (рис. 11).



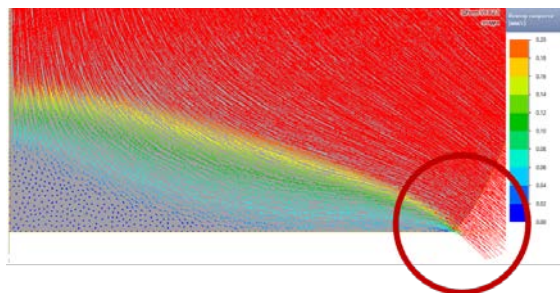
**Рис. 10.** Эпюры нормальных напряжений при пластической и упруго-пластической деформациях



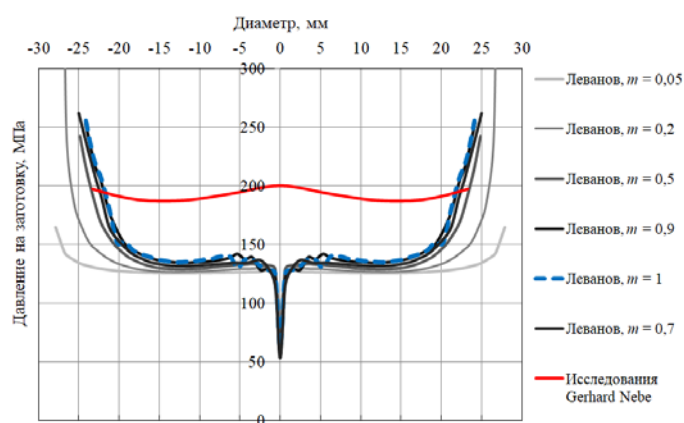
**Рис. 11.** Скорость деформаций в высокой заготовке при осадке на 20 %, направление течения металла

Обтекая упругую зону, металл из центра заготовки поступает на поверхность близ диаметра и создает дополнительные напряжения (рис. 12).

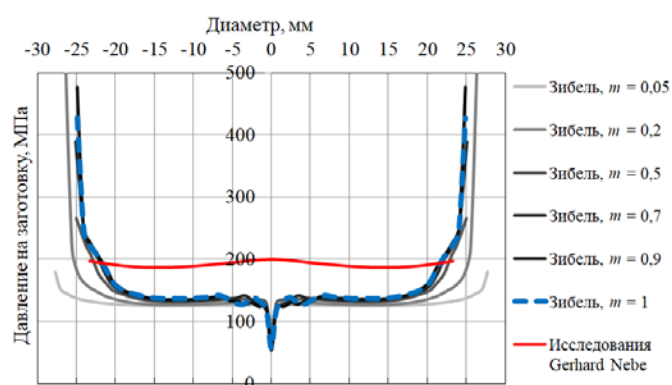
**Рис. 12.** Векторы скоростей узлов сетки конечных элементов в момент осадки высокой заготовки на 50 %, масштаб  $\times 10$



Очевидно, что количество металла, перешедшего со стенки заготовки на поверхность инструмента, напрямую зависит от контактного трения, поэтому следующей задачей было сравнение законов трения (рис. 13). Все предыдущие моделирования осуществлялись по закону трения Леванова с фактором трения  $m = 0,2$ . При варьировании законов и факторов трения было замечено, что значение давления зависит от закона трения и от фактора трения только на краю заготовки. Также чем больше трение, тем больше амплитуда осцилляций.



*a*

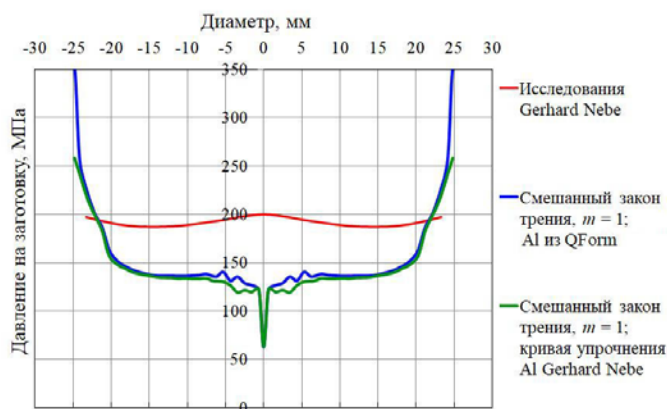


*б*

**Рис. 13.** Сравнение эпюр давлений на заготовку при законах трения:  
*a* — Леванова; *б* — Зибеля при разных факторах трения

Экспериментальные исследования G. Nebe выполнены без смазки, поэтому далее в исследованиях использовали законы трения с  $m = 1$ .

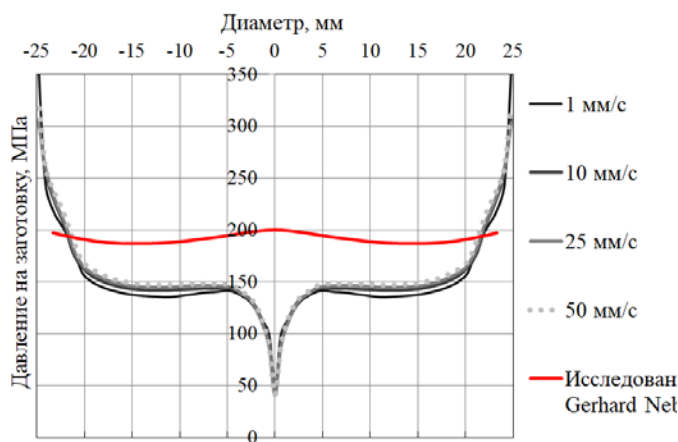
Сравнивались кривые упрочнения алюминия из базы данных QForm и кривые, используемые G. Nebe в своих исследованиях, при смешанном законе трения (рис. 14). Было замечено, что разница при использовании разных кривых упрочнения не значительна. Исходя из этого пришли к заключению, что кривые упрочнения алюминия из базы данных QForm можно использовать для дальнейших исследований.



**Рис. 14.** Сравнение эпюр давлений на заготовку из алюминия из базы данных QForm и предоставленного G. Nebe при смешанном законе трения

При анализе результатов моделирования с различными законами трения было выявлено, что использование смешанного закона трения приводит к появлению осцилляций на эпюрах контактного давления, которые не наблюдаются в экспериментальных исследованиях.

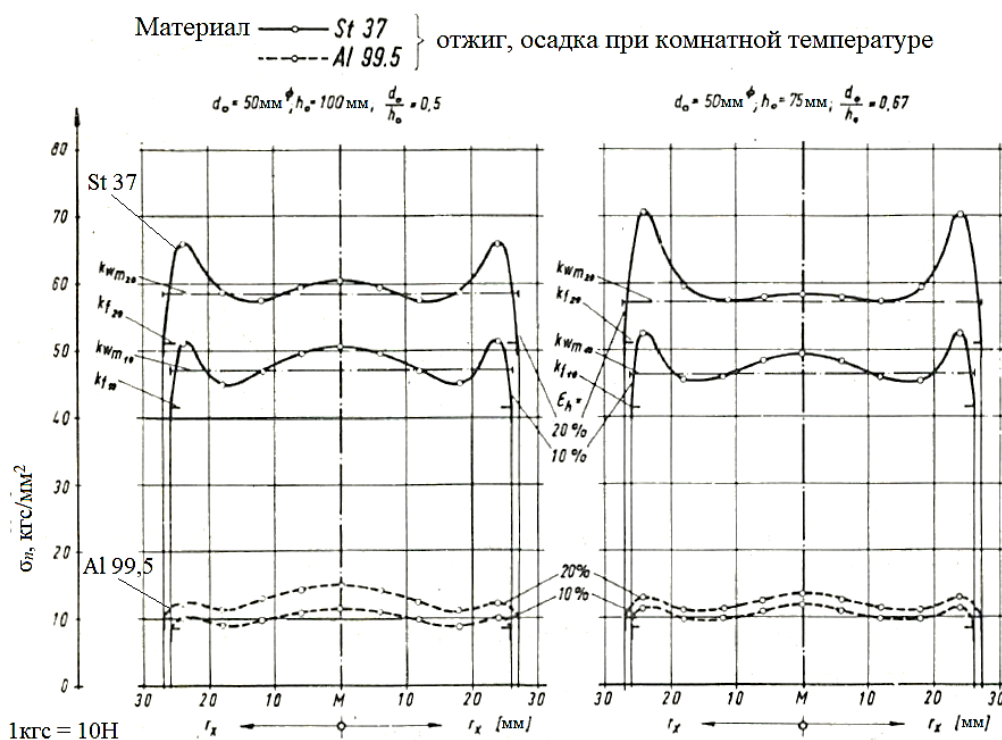
Следующей задачей был анализ влияния скорости деформирования (рис. 15). Выполнено моделирование с различными скоростями движения ползуна. Анализ результатов показал, что скорость движения ползуна в исследуемых пределах незначительно влияет на результаты моделирования, что объясняется малым скоростным упрочнением алюминия при холодной деформации.



**Рис. 15.** Сравнение эпюр давлений на заготовку при разных скоростях деформирования



Сравнение результатов моделирования для алюминия с результатами эксперимента Nebe показывают значительные отличия в максимальных значениях на краю заготовки. Характер эпюр контактных давлений, полученных G. Nebe для стали 37 (рис. 16) качественно лучше соответствует результатам моделирования.



**Рис. 16.** Характер нормальных напряжений и среднее сопротивление деформации цилиндрических заготовок диаметром 50 мм из стали 37 (в сравнении с характером напряжения для алюминия 99,5)

В конечном положении инструмента сила при моделировании принимает значение примерно 0,33 МН. По расчетам, у G. Nebe эта сила составляла 0,38...0,39 МН. Возможной причиной такого различия может являться неидеальная установка месдоз в эксперименте G. Nebe. Можно предположить, что месдозы были установлены в инструменте недостаточно жестко, и происходило заталкивание месдоз заготовкой в отверстие или затекание метала заготовки в отверстия в инструменте (рис. 17), при этом образовывалась недеформируемая зона, что искажает реальные значения напряжения на контакте. Кроме того, погрешность измерений месдоз могла быть значительной за счет сравнительно большого расстояния между ними.

**Заключение.** Подводя итоги проделанной работы, можно сделать вывод о том, что при высоких заготовках ( $d/h < 2$ ) эпюры напряжений на контактных поверхностях заготовки отличаются, от принятых в теории. Полученные в ходе

моделирования эпюры распределения давления качественно отражают действительность. Количественно эпюры, полученные в ходе моделирования, отличаются от эпюр G. Nebe (рис. 18).

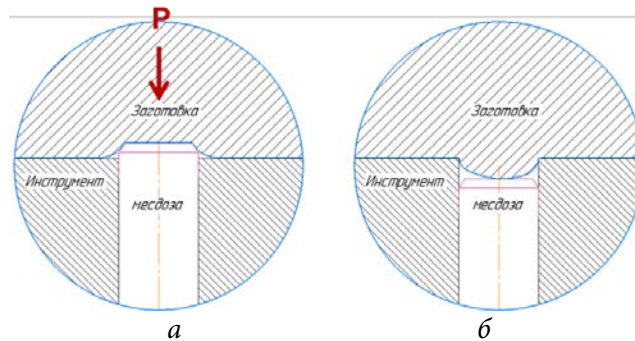
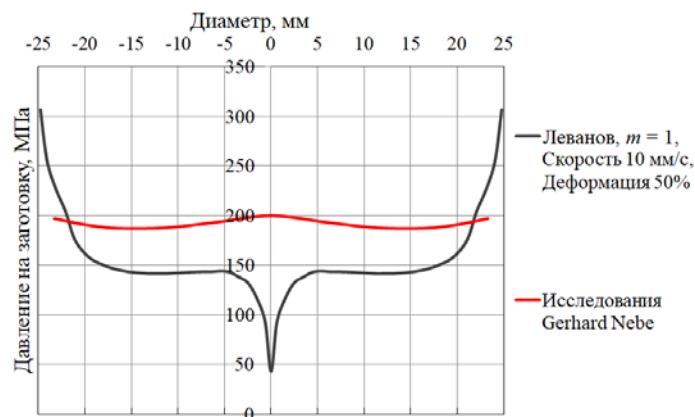


Рис. 17. Возможные проблемы в эксперименте G. Nebe:

*a* — заталкивание месдозы в инструмент;

*б* — затекание металла заготовки в отверстие в инструменте

Рис. 18. Сравнение полученной в ходе моделирования эпюры контактного давления с эпюрой, полученной G. Nebe



В дальнейшем планируется опубликование результатов эксперимента с использованием негативной пленки для создания фотоотпечатков FujiFilm Prescale.

### Литература

- [1] Унксов Е.П. *Инженерная теория пластичности*. Москва, Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1959, 328 с.
- [2] Nebe G. *Über die Spannungs- und Formänderungsverteilung Beim Stauchen*. Aachen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 1965, 112 p.
- [3] Doege E., Behrens B.-A. *Handbuch Umformtechnik*. Hannover, Leibniz Universität, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, 2006, 920 p.
- [4] Биба Н.В., Гладков Ю.А., Мордвинцев П.С., Стебунов С.А. QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2011, № 1, с. 28–31.

- [5] Биба Н.В., Стебунов С.А. QForm – программа, созданная для технологов. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2004, № 9, с. 38–41.
- [6] 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*. Москва, Металлургия, 1976, 415 с.
- [7] Калпин Ю.Г., Перфилов В.И., Петров П.А., Рябов В.А., Филиппов Ю.К. *Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 2011, 244 с.
- [8] Томм А. Что такое Excel и как его правильно использовать.  
URL: <http://officelegko.com/2015/10/27/microsoft-excel-bazovyie-popyatiya/> (дата обращения 20.08.2018).
- [9] Сторожев М.В., Попов Е.А. *Теория обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1977, 423 с.
- [10] Власов А.В. *Основы теории напряженного и деформированного состояний. Основы теории пластичности*. Омск, Изд-во ОмГТУ, 2012, 164 с.

**Денисова Ангелина Фёдоровна** — студентка кафедры «Технологии обработки давлением», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Власов Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**CONTACT PRESSURE DURING THE DRAFT OF HIGH WORKPIECES**

A.F. Denisova

denisova.a.f@gmail.com

SPIN-code: 4898-8802

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

The results of experimental studies for determine the contact pressure during the draft of high workpieces by the method of point messes of Gerhard Nebe, Ph.D. in technology (Dr.-Ing.), were analyzed. It is shown that experimental diagrams of contact pressures have qualitative differences from the known analytical solutions: there are contact pressure peaks at the edge of the sample. The purpose of the research is to identify the causes affecting the nature of the change in normal tension in high workpieces. It is shown that the results of finite element modeling have a good qualitative congruence with the results of experimental studies of G. Nebe. An attempt to explain physically the existence of pressure peaks at the edge of the workpiece was made. The results of the research complement the existing data on contact pressures during the draft of high workpieces.

**Keywords**

Contact pressure, draft, normal tension, finite element method, friction zone, QForm, load cell, contact tension, high workpiece

Received 19.11.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

**References**

- [1] Unksov E.P. Inzhenernaya teoriya plastichnosti [Engineering theory of plasticity]. Moscow, Gos. nauch.-tekh. izd-vo mashinostroitel. lit. publ., 1959, 328 p.
- [2] Nebe G. Über die Spannungs- und Formänderungsverteilung Beim Stauchen. Aachen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 1965, 112 p.
- [3] Doege E., Behrens B.-A. Handbuch Umformtechnik. Hannover, Leibniz Universität, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, 2006, 920 p.
- [4] Biba N.V., Gladkov Yu.A., Mordvintsev P.S., Stebunov S.A. QForm is universal and effective software system for simulation of forging and stamping processes. *Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Material working by pressure], 2011, no. 1, pp. 28–31.
- [5] Biba N.V., Stebunov S.A. QForm is a program, developed for technologists. *Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Material working by pressure], 2004, no. 9, pp. 38–41.
- [6] Levanov A.N., Kolmogorov V.L., Burkin S.P., Kartak B.R., Ashpur Yu.V., Spasskiy Yu.I. Kontaknoe trenie v protsessakh obrabotki metallov davleniem [Contact friction in process of metal treatment by pressure]. Moscow, Metallurgiya publ., 1976, 415 p.
- [7] Kalpin Yu.G., Perfilov V.I., Petrov P.A., Ryabov V.A., Filippov Yu.K. Soprotivlenie deformatsii i plastichnost' pri obrabotke metallov davleniem [Deformation resistance and plasticity at metal treatment by pressure]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2011, 244 p.
- [8] Tomm A. Chto takoe Excel i kak ego pravil'no ispol'zovat' [What is Excel and how to use it correctly]. URL: <http://officelegko.com/2015/10/27/microsoft-excel-bazovyie-ponyatiya/> (accessed 20.08.2018).

- [9] Storozhev M.V., Popov E.A. Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of metal treatment by pressure]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1977, 423 p.
- [10] Vlasov A.V. Osnovy teorii napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniy. Osnovy teorii plastichnosti [Theory fundamentals of strained and deformed condition. Fundamentals of plasticity theory]. Omsk, OmSTU publ., 2012, 164 p.

**Denisova A.F.** — student, Department of Forming Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — A.V. Vlasov, Doctor of Technology, Professor, Department of Forming Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.