

10 Взаимодействие в системе «пневматическое колесо – рельс» транспортного средства на комбинированном ходу / В. А. Довгяло [и др.] // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 6. – С. 604–612.

D. A. CHERNOUS

FORCED LONGITUDINAL OSCILLATIONS OF A VISCOELASTIC ROD

The problem of the forced longitudinal vibrations of a linear viscoelastic rod has been solved. The mechanical properties of the rod material were characterized by three parameters: the instantaneous and long-term Young moduli, relaxation time. The analytical vibration amplitude and displacement-force phase shift – frequency of driving force dependence has been received. The comparison of the dependences obtained with the results of simplified calculation methods has been carried out.

Получено 19.10.2009

ISBN 978-985-468-707-0. Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. Вып. 4. Гомель, 2010

УДК 621.983.5:539.388.24

О. И. ЯКУБОВИЧ, А. О. ШИМАНОВСКИЙ, А. В. ПУТЯТО
Белорусский государственный университет транспорта, Гомель
А. И. КЕБИКОВ
ОАО «САТУРН-1», Житковичи, Беларусь

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ КРЫШКИ ЛЮКА ПОЛУВАГОНА

Разработана компьютерная конечноэлементная модель технологического процесса холодной штамповки крышки люка полувагона. Получены распределения эквивалентных напряжений в заготовке и инструменте на различных стадиях процесса. Установлена зависимость глубины внедрения штампа от силы, реализуемой при прессовании. Определены значения минимальной силы, необходимой для формовки изделия, при различных значениях предела текучести материала заготовки.

Методы расчета сил, необходимых для деформирования заготовки в условиях холодной штамповки выдавливанием, разработанные на основе теории пластичности, не всегда позволяют учитывать наиболее важные факторы. Поэтому при разработке технологических процессов холодной штамповки выдавливанием часто используют результаты и рекомендации, полученные при экспериментальных исследованиях и накопленные производственной практикой.

Особенность холодной штамповки выдавливанием – необходимость создания для деформирования заготовки высоких удельных сил, превышающих в некоторых случаях в 4 раза напряжения текучести обрабатываемого материала [1]. В связи с этим актуальной является задача по нахождению минималь-

ных значений сил, необходимых для обеспечения процесса штамповки. На предприятиях до настоящего времени используются приближенные аналитические методы решения названной задачи, которые не всегда позволяют выполнить расчет с достаточной для производства степенью точности [2–5]. Это в свою очередь может приводить к необоснованным затратам на приобретение дорогостоящего технологического оборудования повышенной мощности. В представленной работе поставлена задача по уточненному определению сил, необходимых для выдавливания крышек люка полувагона.

Разработка конечноэлементной модели деформирования заготовки предполагает несколько этапов:

- 1 Создание геометрической модели.
- 2 Задание свойств материалов.
- 3 Создание сетки конечных элементов на заготовке и инструменте.
- 4 Задание контактных пар.
- 5 Наложение граничных условий.

Для создания геометрической модели штампа использован чертеж готового листа крышки люка полувагона, приведенный на рисунке 1.

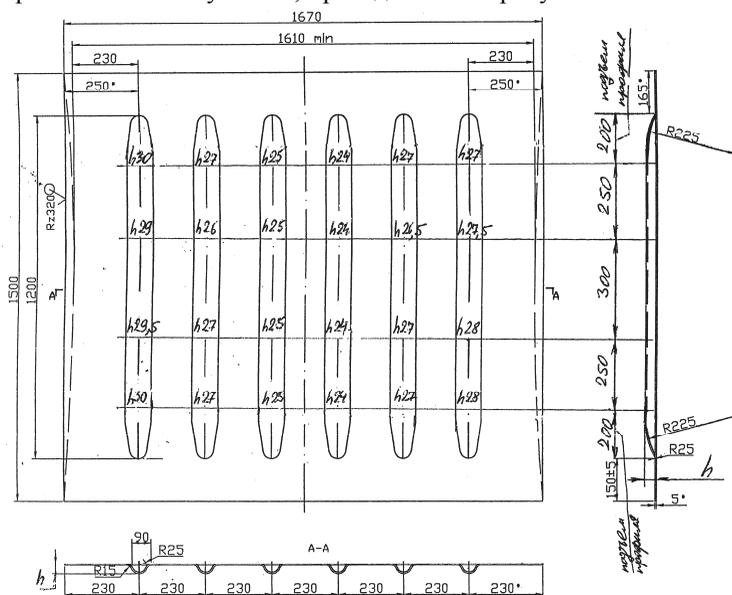


Рисунок 1 – Крышка люка полувагона

Форма геометрической модели в данной задаче определяется срединными поверхностями оболочек, моделирующих инструмент и заготовку. Оболочки, моделирующие пуансон и прижим, приняты абсолютно твердыми. Построение трехмерной модели можно выполнить несколькими способами. В на-

стоящей задаче удобно срединную поверхность заготовки задать непосредственным построением, а срединные поверхности матрицы и пуансона построить по следующему алгоритму: сначала создать объем в виде полого цилиндра, затем удалить внутренний объем и внешние ненужные поверхности, потом скруглить сопряженные поверхности переходным радиусом.

Для удобства построения начало координат следует совместить с центром срединной поверхности заготовки, а ось OZ направить вдоль оси симметрии. В этом случае ось OX будет находиться в плоскости сечения, а ось OY направлена перпендикулярно ей.

Окончательно на основе применения трехмерного моделирования получена геометрическая модель пуансона, заготовки и прижима, изображение $\frac{1}{4}$ части которых представлено на рисунке 2.

Каждому компоненту модели (пуансон, заготовка и матрица) задается свой номер материала. Поскольку пуансон и прижим приняты жесткими, то задание свойств материалов потребовалось только для заготовки.

Исходная **заготовка** представляет собой горячекатаный лист из стали 09Г2С. Механические характеристики названного материала, произведенного на разных предприятиях, могут изменяться в достаточно широких пределах, о чем свидетельствует таблица 1.

Таблица 1 – Механические характеристики стали 09Г2С различных производителей

Производитель проката листового горячекатаного	Номер партии	Временное сопротивление, Н/мм ²	Предел текучести, Н/мм ²	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость при старении, Дж/см ²	Ударная вязкость при $t = -40^\circ$, Дж/см ²
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»	38658	545	371	30,5	77	107
	38659	535	367	31,0	82	115
	38665	530	365	32,0	77	102
Череповецкий металлургический комбинат «СеверСталь»	3701	538	389	30	114	105
	4040	557	416	30	112	99
Металлургический комбинат им. Ильича, г. Мариуполь	5898	510	420	32	–	43
По ГОСТ 19282-73	–	490	345	21	64	39

Модель материала заготовки – пластический материал с кинематическим упрочнением. Для него заданы значение плотности – 7800 кг/м³, модуля упругости – $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициента Пуассона – 0,3. Значения предела текучести и модуля упрочнения задавались в соответствии с исходными данными, приведенными в таблице 1.

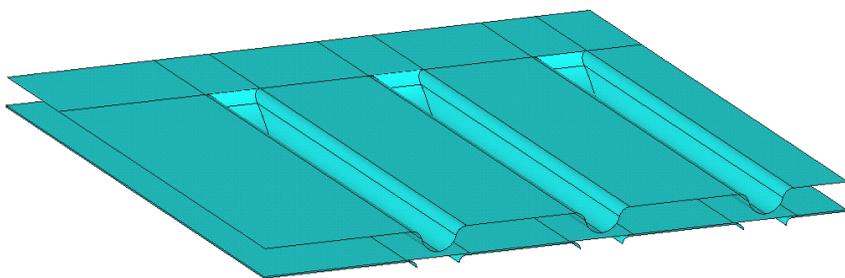


Рисунок 2 – Геометрическая модель ¼ части рассматриваемой системы

На этапе создания сетки конечных элементов выполнены мероприятия по созданию максимально возможного количества областей с регулярной сеткой конечных элементов. В окрестностях точек, где предполагаются большие градиенты напряжений, нанесена более мелкая сетка.

В рамках построения КЭ модели *созданы контактные пары*. Тип контакта для всех пар автоматический “поверхность – поверхность”. Этот тип позволяет учитывать толщины оболочек. Статический коэффициент трения в рассматриваемом случае установлен 0,08 [14]; коэффициент вязкостного трения позволяет ограничить удельные силы трения, его следует задавать

$$\tau_{\max} = k = \sigma_T / \sqrt{3},$$

где σ_T – предел текучести материала. В рассматриваемом случае имеем две контактирующие пары «пуансон – заготовка» и «заготовка – матрица».

Наложение граничных условий предполагает задание ограничения степеней свободы для твердых тел. Например, пуансон может перемещаться только вдоль оси Y , поэтому для него ограничиваются перемещения (translational) вдоль осей X и Z (X and Z disps) и все повороты (rotational) – All rotations. На модель накладываются условия симметричности конструкции. Кроме того, анализ показал, что из-за периодичности конструкции для определения суммарной силы, необходимой для штамповки шести гофр, достаточно рассмотреть процесс формирования половины одной гофры.

В данной задаче в качестве внешней нагрузки задается движение пуансона с определенной скоростью, определяемой режимом работы прессы. Ориентировочный путь, который должен совершить пуансон до завершения процесса штамповки гофр, с учетом зазоров между пуансоном, заготовкой и матрицей равен 34 мм. Таким образом, время перемещения пуансона с постоянной скоростью 0,03 м/с составит 1,16 с. Для задания вышеуказанного нагружения в программе необходимо создать массивы для времени и скорости пуансона.

На рисунке 3 представлены схемы распределения эквивалентных по Мизесу напряжений для разных моментов времени формовки.

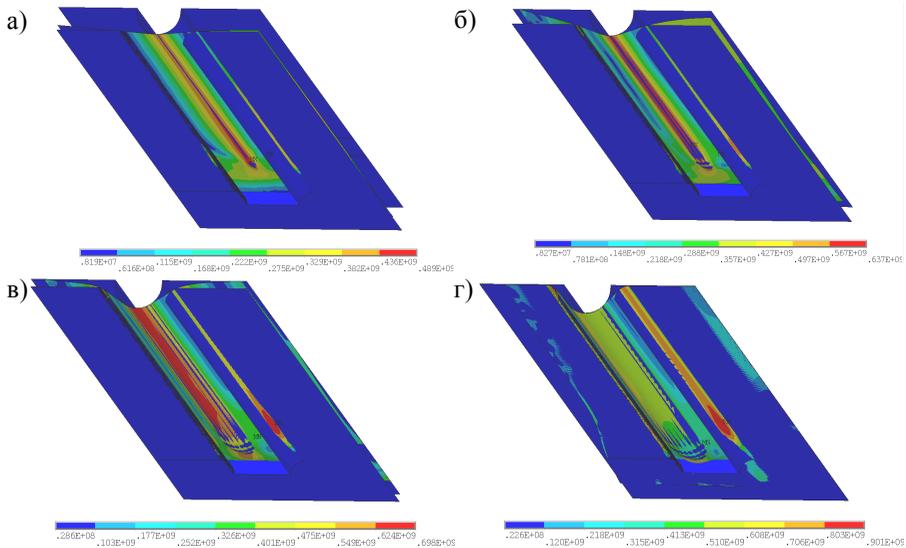


Рисунок 3 – Схемы распределений эквивалентных по Мизесу напряжений для различных моментов времени: а – 0,3 с; б – 0,6 с; в – 0,9 с; г – 1,16 с

В представленной работе выполнен расчет сил, необходимых для создания гофрированной поверхности крышки люка полувагона, изготавливаемой из листового проката толщиной 5 мм (сталь 09Г2С). Решалась рассматриваемая задача на основе применения конечноэлементного подхода с использованием программного комплекса LS-DYNA [2]. Принималось, что штамп является абсолютно жестким, а обрабатываемый материал имеет билинейную зависимость “напряжение – деформация”. Периодичность формы листа позволила ограничиться рассмотрением деформирования половины одной гофры. В качестве внешней нагрузки принималось движение пуансона со скоростью 0,03 м/с, определяемой режимом работы пресса.

По результатам вычислений получена зависимость силы, необходимой для внедрения штампа в заготовку, от глубины внедрения. Расчеты показали, что при значениях внедрения штампа, не превышающих 28 мм, эта зависимость близка к линейной. В то же время увеличение глубины внедрения с 28,5 до 30 мм приводит к росту потребной силы в 2 раза. Результаты вычислений показали, что при формовке гофры глубиной 30 мм весьма незначительное увеличение хода пуансона, сопоставимое с точностью настройки оборудования, приводит к увеличению потребной силы до значения, превышающего 15 МН, соответствующего номинальной силе имеющегося пресса.

Выполненные расчеты сжимающих сил, соответствующих различным глубинам внедрения штампа, показали, что повышение предела текучести мате-

риала формируемой детали ведет к представленному на рисунке 4 увеличению их значений. Весьма незначительное (на 0,4 мм) уменьшение глубины внедрения штампа ведет к снижению потребной силы до значений, не превышающих 15 МН. Поэтому с целью гарантированного снижения нагрузки на штамповочное оборудование целесообразно осуществлять внедрение пуансона в заготовку на глубину, не превышающую 29,5 мм.

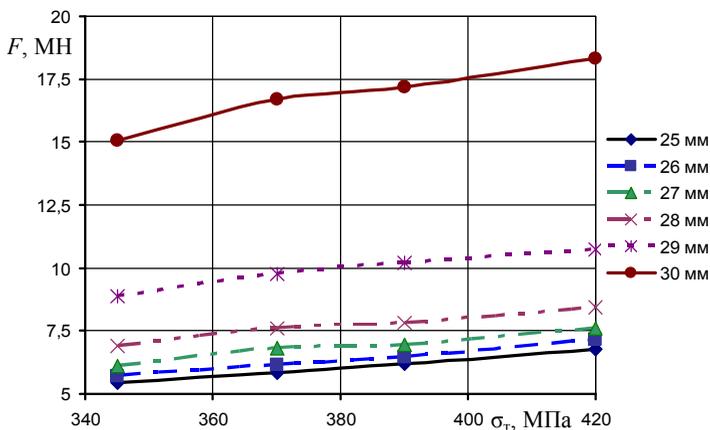


Рисунок 4 – Зависимость силы прижима от глубины внедрения пуансона

Уменьшение трения между инструментом и заготовкой путем применения специальных смазывающих составов приводит к уменьшению значений сил формовки. Снижение коэффициента трения на 0,02 соответствует уменьшению предела текучести материала на 25 МПа при нахождении потребной сжимающей силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Аверкиев, Ю. А.** Холодная штамповка: Формоизменяющие операции / Ю. А. Аверкиев. – Ростов н/Д: Изд-во Ростовск. гос. ун-та, 1984. – 228 с.
- 2 **Бузлаев, Д.** Компьютерное моделирование листовой штамповки с применением современных материалов / Д. Бузлаев // «САПР и графика» 6: Инструменты конструктора-технолога. – 2004. – С. 28 – 30.
- 3 **Грешнов, В. М.** Физико-феноменологическая модель пластичности для решения задач обработки металлов давлением / В. М. Грешнов И. В. Патяева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 10. – С. 13–20.
- 4 **Климьчев, С. Б.** Повышение эффективности листовой штамповки с применением средств математического моделирования на ОАО "ГАЗ" / С. Б. Климьчев, Д. Г. Захаров, А. А. Афанасьев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 2. – С. 27–28.

5 **Мамутов, В. С.** Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки: учеб. пособие / В. С. Мамутов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 188 с.

6 **Шимановский, А. О.** Моделирование контактного взаимодействия колеса и рельса // Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту. – 2008. – № 96. – С. 163–167.

O. I. YAKUBOVICH, A. O. SHIMANOVSKY, A. V. PUTSIATA, A. I. KEBIKOV
**FINITE ELEMENT MODELLING OF THE PROCESS
OF COLD PRESSING FOR THE GONDOLA CAR HATCH COVER**

A computer finite element model of the technological process of cold stamping for the gondola car hatch cover has been developed. The distributions of equivalent blank and tool stresses during the stages of the process have been received. The depth of punch penetration - force implemented during pressing dependence has been determined. The calculation of the minimum force necessary for molding products for different yield strength of blank material has been done.

Получено 10.12.2009