

Подставим в формулу (6) значения (3), (4), (5):

$$\int_{-\frac{S}{2}}^{\frac{\beta\sigma_s\rho}{E}} [-\beta\sigma_s + E\varepsilon - \beta A(-\frac{y}{\rho} - \frac{\beta\sigma_s}{E})^n] dy + \int_{\frac{\beta\sigma_s\rho}{E}}^{\frac{(\beta\sigma_s-q)\rho}{E}-\varepsilon\rho} (\frac{Ey}{\rho} + E\varepsilon) dy +$$

$$+ \int_{\frac{(\beta\sigma_s-q)\rho}{E}}^{\frac{S}{2}} [\beta\sigma_s - q + \beta A(\frac{y}{\rho} + \varepsilon - \frac{\beta\sigma_s - q}{E})^n] dy = 0. \quad (7)$$

Интегрирование выражения (7) приводит к трансцендентному уравнению относительно величины  $\varepsilon$ . Поэтому его решение будем искать в численном виде при нахождении остаточной кривизны детали после правки.

Изгибающий момент, который создает эпюра напряжений  $\sigma_x$  в сечении детали после правки, можно найти по формуле:

$$M = b \int_{-\frac{S}{2}}^{\frac{S}{2}} \sigma_x y dy = b \int_{-\frac{S}{2}}^{\frac{\beta\sigma_s\rho}{E}} [-\beta\sigma_s + E\varepsilon - \beta A(-\frac{y}{\rho} + \frac{\beta\sigma_s}{E})^n] y dy +$$

$$+ b \int_{\frac{\beta\sigma_s\rho}{E}}^{\frac{(\beta\sigma_s-q)\rho}{E}-\varepsilon\rho} (\frac{Ey}{\rho} + E\varepsilon) y dy + b \int_{\frac{(\beta\sigma_s-q)\rho}{E}-\varepsilon\rho}^{\frac{S}{2}} [\beta\sigma_s - q + \beta A(\frac{y}{\rho} + \varepsilon - \frac{\beta\sigma_s - q}{E})^n] y dy,$$

где  $b$  - ширина детали.

После снятия нагрузки изгибающий момент приводит к изгибу; деталь получает остаточную кривизну  $\frac{1}{\rho}$ :  $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ}$ ,

где  $J$  - момент инерции сечения; при прямоугольном сечении  $J = \frac{bS^3}{24}$ .

### Список литературы

1. Норицын И. А., Калпина Ю. Г., Определение угла пружинения при одноугловой гибке, Вестник Машиностроения, №1, Москва, 1968 г. 63-66 с.
2. Калпин Ю.Г., Перфилов В.И., Петров П.А., Рябов В.А., Филиппов Ю.К. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Учебное пособие // М.:Машиностроение . 2011. 244с., 73 ил.
3. Типалин С.А. Исследование и разработка методики расчета процесса профилирования ленты при локальном формоизменении /Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 1998.
4. Типалин С.А. Исследование изгиба упрочненного оцинкованного листа / МГТУ «МАМИ» 2012. №2. С.199-204.

### **Моделирование механических испытаний для изучения сопротивления деформации при резких изменениях скорости деформации**

Потапенко К.Е., Воронков В. И., к.т.н. доц. Петров П.А.

Университет машиностроения  
8(495)223-05-23, доб. 1306, v-i-w@bk.ru

*Аннотация:* В данной статье описана методика моделирования механических

испытаний при переменных скоростях деформации. Было проведено сравнение результатов моделирования с данными, полученными при проведении экспериментов. Расчёты выполнены в программе для моделирования и оптимизации процессов обработки материалов давлением QForm. По результатам сравнения выбраны направления дальнейших исследований, связанные с определением математических моделей сопротивления деформации, а также указаны требования к программному обеспечению для моделирования механических испытаний.

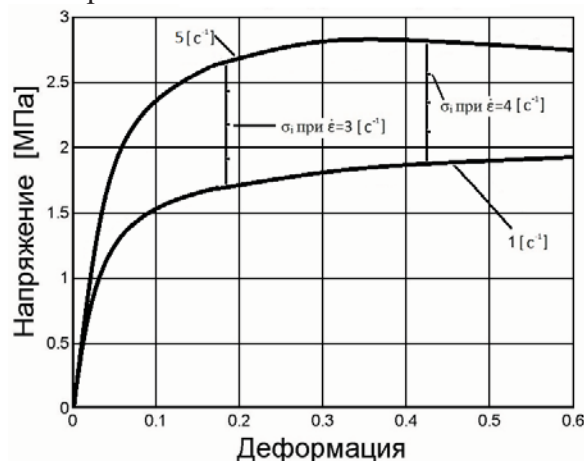
*Ключевые слова:* резкое изменение скорости деформации, механические испытания, алюминиевые сплавы, компьютерное моделирование, QForm, кривые текучести

### Введение

При формоизменении материала в очаге деформации часто возникают скачки скорости деформации. Так, например, при штамповке детали типа стакан по схеме обратного выдавливания в зоне перехода от кольцевой полости к вертикальной скорость деформации изменяется в среднем в 10 раз [1]. При моделировании подобных операций необходимо быть уверенным в точности расчёта напряжения текучести в области резкого изменения скорости деформации. При условии, что кривые текучести для фиксированных скоростей деформации определены верно, можно считать, что при расчёте деформирования с постоянной либо плавной изменяющейся скоростью деформации напряжение текучести будет определяться с точностью, обеспечивающей корректные результаты моделирования [6-11]. Поэтому определение напряжения текучести в момент изменения скорости деформации и его значения является важной задачей, которая связана с решением двух важных вопросов.

1. Изменения напряжения текучести при резком изменении скорости деформации носят достаточно сложный характер и описываются линейной интерполяцией (рисунок 1) между двумя заданными кривыми текучести.

2. При скачке скорости деформации необходимо учитывать историю нагружения, влияющую на микроструктуру материала, а расчёт напряжения текучести по кривым текучести, определённым для фиксированных значений скорости деформации, не позволяет этого сделать, в результате чего напряжение текучести после скачка деформации может быть завышено или занижено относительно реального.



**Рисунок 1.** Линейная интерполяция при определении промежуточных значений напряжения текучести в интервале скоростей деформаций  $1 \div 5 \text{ [с}^{-1}\text{]}$  при температуре  $400^\circ\text{C}$

Для проверки влияния резкого изменения скорости деформации на точность моделирования была проведена серия экспериментов по осадке цилиндрических образцов из алюминиевых сплавов со скачкообразным характером изменения скорости деформации. Экспериментально полученные диаграммы силы сравнивались с расчётными значениями, полученными по результатам моделирования, полностью совпадающим с условиями проведения испытаний. Результаты сравнения дают возможность оценить точность моделирования резкого

изменения скорости деформации при задании материала рядом кривых текучести, определённых для фиксированного значения температуры и скорости деформации.

### Проведение экспериментов

Испытания проводились методом осадки цилиндрических образцов. Для этого были изготовлены образцы из алюминиевых сплавов АД35, AW<sup>1</sup>-6082 (аналог российского сплава АД35) и АД31 высотой  $H_0 = 10$  мм и диаметром -  $D_0 = 10$  мм. Испытания проводились при температурах 350°C и 430°C на универсальной испытательной машине INSTRON VHS (VHS 8800 family)<sup>2</sup> с номинальной силой 400 кН в изотермических условиях без нанесения смазки на контактную поверхность образцов. Осадка образцов производилась за один ход траверсы машины с двумя различными скоростями деформации в соответствии с данными, приведенными в таблице 1. Закон перемещения траверсы испытательной машины обеспечивал постоянство скорости деформации на каждом из двух этапов осадки между которыми осуществлялся резкий переход с одной скорости деформации на другую.

Таблица 1

### Условия проведения испытаний

Материал		Скорость деформации, с <sup>-1</sup>					
		АД35		AW-6082		АД31	
Температура	350 °C	1→10	10→1	1→10	10→1	1→10	10→1
	430 °C	1→10	10→1	1→10	10→1	1→10	10→1

Моделирование вышеописанных механических испытаний проводилось в программе QForm. Исследуемые сплавы определялись кривыми текучести, полученными для фиксированных значений температур (300 °C, 350 °C, 430 °C и 510 °C) и фиксированных значений скоростей деформации (0,1 с<sup>-1</sup>; 1 с<sup>-1</sup>; 10 с<sup>-1</sup>; 50 с<sup>-1</sup>) [2]. Момент перехода с одной скорости деформации на другую задавался в соответствии с экспериментальными данными [3, 4].

Результаты моделирования сравнивались со значениями, полученными экспериментально на основании формулы (1). Если расчётные данные укладывались в указанную границу доверительного интервала, то моделирование считалось корректным, а используемые кривые текучести, определённые для фиксированных значений скоростей деформации, – пригодными для моделирования процессов деформирования с резким изменением скорости деформации.

$$\delta = \left| \frac{P_{QFORM} - P_{эксн}}{P_{эксн}} \times 100\% \right| \leq 2,5\%, \quad (1)$$

где  $\delta$  – относительная погрешность измерений;  $P_{QFORM}$  – сила деформирования, полученная по результатам расчета в программе QForm;  $P_{эксн}$  – сила деформирования, полученная по результатам проведенных испытаний.

На рисунке 2 показано сравнение экспериментальных графиков силы, полученных при осадке образцов с переменной скоростью деформации, и расчётных графиков силы, полученных при воспроизведении экспериментов путём их моделирования в системе QForm. Экспериментальная диаграмма силы представлена в виде границы доверительного интервала, который составляет  $\pm 2,5\%$  от значения силы, полученного при проведении испытаний. Результаты совпадения моделирования с экспериментальными значениями для температуры 350°C приведены в статье [5].

При переходе с большей скорости деформации на меньшую в начале третьего участка расчётные кривые занижены относительно экспериментальных (рисунок 2). Такой эффект можно объяснить тем, что при деформации с большей скоростью материал успевает меньше разупрочниться, чем при деформации с меньшей скоростью. В результате при одной и той же накопленной деформации плотность дислокаций различная, что не учитывается при рас-

<sup>1</sup> AW - aluminium wrought alloy - обозначение группы алюминиевых деформируемых сплавов

<sup>2</sup> Оборудование установлено в институте обработки металлов давлением Технического университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия)

чѐте напряжения по кривым текучести, построенным для фиксированных значений скорости деформации.

### Выводы

Похожая картина наблюдается при деформировании по программе перехода с меньшей скорости деформации на большую. В этом случае расчѐтная кривая силы на третьем участке совпадает либо оказывается ближе к верхней границе доверительного интервала (рисунок 2), что также можно объяснить отсутствием учёта истории нагружения при расчѐте.

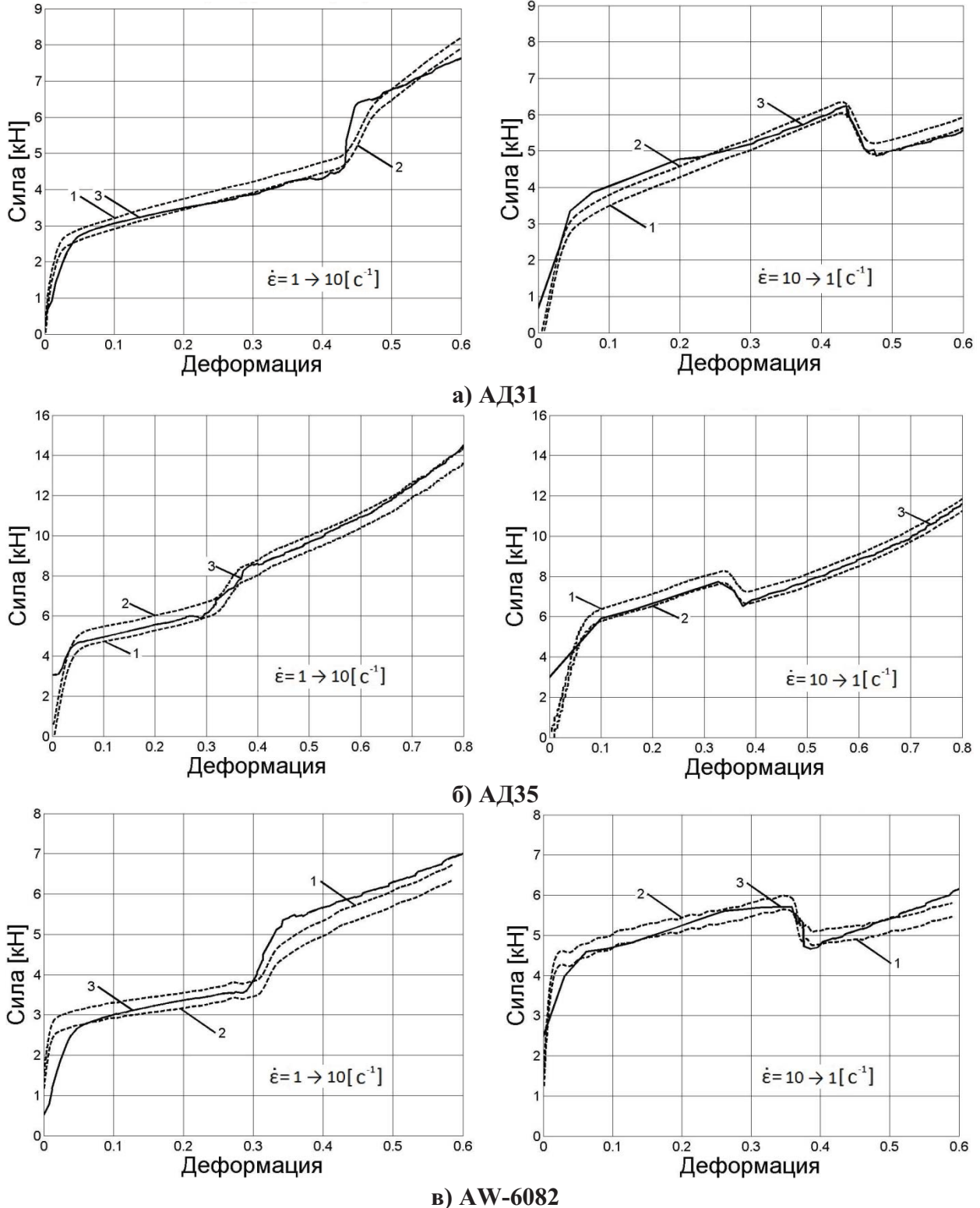


Рисунок 2. Достигнутое совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными при температуре испытания  $430^{\circ}C$  (1, 2 – границы доверительного интервала; 3 – кривые силы, полученные расчѐтным способом)

### Заключение

По результатам сопоставления расчётных и экспериментальных данных можно сделать вывод, что моделирование процессов ОМД, в которых наблюдается резкое изменение скорости деформации с использованием кривых, построенных для фиксированных значений скорости деформации, должно давать удовлетворительный результат, т.к. в большинстве случаев расчётные графики силы на третьем участке укладывались в доверительный интервал (рисунк 2). Однако при расчёте технологических процессов, в которых происходит заполнение металлом длинных и тонких полостей (штамповка крыльчаток, заборников и т.п.) для определения напряжения текучести лучше использовать модели сопротивления деформации, учитывающие историю нагружения материала, т.к. неточности в определении напряжения текучести сильно влияют на результирующее значение силы деформирования.

Применение при расчётах различных моделей сопротивления деформации, например, моделей, учитывающих историю нагружения материала, возможно только при условии, что программный код, который задаёт напряжение текучести в используемой программе, является открытым. Т.е. у пользователя должна быть возможность самостоятельно задавать функции зависимости напряжения текучести от времени, накопленной деформации или других величин, которые позволяют описать влияние исследуемого физического процесса на сопротивление деформации.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ГК № 14.740.11.0584.

### Литература

1. Гринберг И. В., Петров П. А., Гневашев Д. А., Воронков В. И., Физическое и математическое моделирование процесса изготовления тонкостенных оболочек в штампе для выдавливания: Технология легких сплавов: 2, 2010, стр. 101 – 106.
2. Воронков В. И., Потапенко К. Е., Определение кривых текучести материалов с применением компьютерного моделирования. Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров»: МГТУ «МАМИ» 2012, стр. 115 – 124.
3. Petrov P., Voronkov V., Potapenko K., Ivanov V., The Effect of transient change in strain rate on plastic flow behaviour of Al-Mg-Si alloy at elevated temperatures, Proceedings of the 14<sup>th</sup> international conference on material forming ESAFORM, AIP Conference Proceedings, Vol. 1353, 2011, pp. 374 – 379.
4. Petrov P., Voronkov V., Potapenko K., Petrov M., Research into flow stress of Al-Mg-Si alloy during the abrupt change of the strain rate at elevated temperatures: Computer Methods in Materials Science: Proceedings of the conference Komplastech: 2013, pp. 63 – 67.
5. Petrov P., Voronkov V., Potapenko K., Petrov M., Gamzina O., Research into the flow stress of Al-Mg-Si alloy (AD-35) during the abrupt change of the strain rate at elevated temperatures, Key Engineering Materials, Proceedings of the international conference on material forming ESAFORM, Vols. 554 – 557, 2013, pp. 1099 – 1104
6. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Исследование свойств многослойных листовых материалов / Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №1. С.28-31.
7. Типалин С.А. Определение накопленной деформации в процессе выдавливания технологической канавки / Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №8. С.22-29.
8. Крутина Е.В., Калпин Ю.Г. Определение пластичности металлов методом комбинированного поперечного выдавливания и высадки / Известия МГТУ «МАМИ» . 2012. Т.2. №2. С.95-98.
9. Соболев Я.А., Аверкиев А.Ю., Шпунькин Н.Ф., Феофанова А.Е. Ковка и штамповка / Справочник в 4 т. / Москва 2010.
10. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала / Известия МГТУ «МАМИ» 2010. №1. С166-170.
11. Потапенко К.Е., Пеньков И.В., Воронков В.И., Петров П.А., Шайхулов М.В. Исследования

ние контактного трения при горячей пластической деформации сплава АВ / Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №6. С.18-21.

### **Горизонтальный бесшаботный молот с гидравлической связью масс**

Кобелев А.Г., Чашкин Д.С.

МГТУ «СТАНКИН»

8 (915) 236-56-94, [dborgir@inbox.ru](mailto:dborgir@inbox.ru), 8 (910) 466-84-96, [shake69@bk.ru](mailto:shake69@bk.ru)

*Аннотация:* В статье описывается конструкция горизонтального бесшаботного молота и принцип его работы. Целью разработки является повышение точности синхронизации встречного движения ударных масс. Результатом разработки является новая конструкция, которая сочетает в себе гидравлический механизм синхронизации и горизонтальную компоновку молота.

*Ключевые слова:* горизонтальный молот, бесшаботный молот, гидравлическая связь, ударные массы, штамповка.

Изготовление заготовок и готовых деталей методами обработки давлением занимают существенное место в технологических процессах, характерных для машиностроительных предприятий оборонно-промышленного, авиастроительного, судостроительного, ракетно-космического и атомного комплексов. Задачи модернизации и повышения эффективности этих предприятий требуют внедрения на них современного импортозамещающего технологического оборудования для обработки давлением (кузнечно-прессового оборудования), позволяющего изготавливать точные заготовки сложной формы из различных материалов с минимальными припусками под механическую обработку. Такое оборудование существенно сокращает время и себестоимость серийного производства продукции, в том числе оборонного значения, следствием чего становится значительная экономия средств государственного бюджета, направляемых на финансирование государственного оборонного заказа.

Изготовление заготовок и готовых деталей методами обработки давлением занимают существенное место в ракетостроении, в атомной энергетике, в производстве медицинского и слесарного инструмента. На смену устаревшему оборудованию для изготовления конкурентно способной продукции должны придти новые виды машин, экономически выгодные по части рационального использования потребляемой энергии [1].

Молоты с горизонтальным встречным движением ударных масс называют импакторами. Такие молоты применяют в промышленности зарубежных стран для штамповки и свободной ковки небольших поковок массой менее 1 кг. Две массы — левая и правая — движутся в горизонтальной плоскости навстречу друг другу под действием сжатого воздуха, который подается одновременно в левый и правый рабочие цилиндры. Плоскость соударения находится в середине исходного расстояния между массами. В этой плоскости должна находиться заготовка. Движение обеих масс должно быть строго синхронизировано, в этом состоит основная трудность наладки и эксплуатации импакторов. Заготовку обычно закрепляют в специальных клещевых захватах, которые в автоматизированных установках перемещаются с помощью специального конвейера [2].

Преимуществом импакторов является то, что работа на них может быть полностью механизирована. Заготовку подвешивают над импактором в захватах конвейера в плоскости удара. Энергия удара частично переходит в теплоту, поглощаемую поковкой. При полной автоматизации это позволяет осуществлять процесс штамповки тонких и труднодеформируемых изделий при небольшом числе ударов за один нагрев.

В силу отсутствия в настоящее время высокопроизводительных и низких по себестоимости молотов отечественного производства, их создание приобретает актуальность.

Исходя из этого был разработан горизонтальный бесшаботный молот с энергией удара 4 кДж, отличительной особенностью которого является применение в качестве механизма синхронизации встречного движения ударных масс, средств гидравлической связи.