

УДК 621.735:519.673

Власов А. В.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Холодная деформация приводит к изменению механических свойств металлов и сплавов, в частности к повышению предела прочности и снижению относительного удлинения. Необходимые значения этих величин в каждом конкретном случае определяются техническими требованиями на готовую деталь. При обработке давлением напряженно-деформированное состояние крайне неоднородно, что приводит к существенному различию механических свойств в различных точках детали. Создание методики прогнозирования механических свойств заготовки позволяет обоснованно подходить к выбору технологических режимов процесса холодной деформации. Решение этой задачи особенно актуально для тех технологических процессов, которые специально предназначены для улучшения механических свойств исходного материала.

Современные методы расчета [1], основанные на конечно-элементном моделировании, позволяют определить напряженно-деформированное состояние изделия в произвольный момент технологического процесса в любой материальной точке, но не дают ответа на вопрос, какова будет прочность и пластичность материала после его обработки давлением. Для прогнозирования механических свойств необходимо уметь рассчитывать остаточный ресурс пластичности материала. До настоящего времени отсутствует общепризнанная методика расчета поврежденности материала при холодной пластической деформации. Наибольшее распространение получили критерии Cockcroft-Latham [2] (включен в программный комплекс Deform), Johnson-Cook [3] (включен в программный комплекс LS-DYNA), Т. Wierzbicki [4], В. Л. Колмогорова [5], В. А. Огородникова [6] и Г. Д. Деля [7]. Большинство критериев носят скалярный характер и базируются на интегрировании накопленной пластической деформации по пути деформирования с учетом различных поправочных коэффициентов, учитывающих схему напряженного состояния, но не учитывают возможную анизотропию накопления повреждений. Однако экспериментальные данные свидетельствуют, что накопление повреждений зависит от направления деформации, и при смене ее знака накопленные дефекты могут частично залечиваться. Например, заготовку, достигшую разрушения при однородном растяжении, затем можно подвергать сжатию в том же направлении без видимых нарушений сплошности.

Этот факт учитывается тензорным деформационным критерием Г. Д. Деля. Критерий поврежденности Г. Д. Деля учитывает анизотропию накопления повреждений и зависит от кривизны траектории деформаций в пространстве деформаций. Поэтому он наилучшим образом подходит для оценки поврежденности холодной деформации со сложной историей нагружения, например при радиальной ковке. Согласно этому критерию степень поврежденности в пространственных направлениях определяется тензором повреждений ψ_{ij} , компоненты которого определяют по формуле:

$$\psi_{ij} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_t} F(\bar{\varepsilon}_t, \eta) \beta_{ij} d\bar{\varepsilon}.$$

Здесь $\bar{\varepsilon}_t$ – накопленная деформация к моменту времени t ;

β_{ij} – компоненты направляющего тензора скоростей деформаций.

Функция $F(\bar{\varepsilon}_t, \eta)$ согласно [7] имеет вид:

$$F(\bar{\varepsilon}_t, \eta) = \frac{1-\alpha}{\bar{\varepsilon}_0(\eta)} + \frac{2\alpha\bar{\varepsilon}_t}{\bar{\varepsilon}_0^2(\eta)},$$

где α – коэффициент, отражающий нелинейность накопления повреждений, %;

$\bar{\varepsilon}_0(\eta)$ – математическое описание диаграммы пластичности;

η – жесткость напряженного состояния.

Условием появления макротрещины (условие разрушения) является равенство единице модуля тензора повреждений:

$$\psi = \sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}} = 1.$$

В предшествующих исследованиях [10] была разработана постпроцессорная программа, позволяющая определять накопленную поврежденность материала при холодной деформации по результатам математического моделирования в программном комплексе Deform [9].

Исходными данными для работы подпрограммы расчета поврежденности [10] является база данных результатов расчета в программном комплексе Deform и файл исходных данных, содержащий коэффициенты аппроксимации диаграммы пластичности экспоненциальной функцией и сведения о повороте заготовки как жесткого целого между операциями.

Тестирование подпрограммы проводилось для операции протяжки бруска с квадрата на квадрат на плоских бойках с кантовкой заготовки на 90° после каждого обжатия. Такая операция, в отличие от радиальной ковки, допускает аналитическое решение [8], что позволяет провести верификацию методики. Полученные в результате моделирования результаты совпадают с аналитическими расчетами с ошибкой до 2 %.

Целью настоящей работы является разработка методики прогнозирования механических свойств заготовки по результатам конечно-элементного моделирования холодной пластической деформации, базирующаяся на определении поврежденности материала по критерию Г. Д. Деля и ее экспериментальная проверка для процесса радиальной ковки.

Методика предназначена для прогнозирования предела прочности (временного сопротивления) материала σ_B и относительного удлинения при разрыве δ . Исходными данными для реализации методики является кривая упрочнения и диаграмма пластичности материала. Прогнозирование механических свойств осуществляется расчетным путем и состоит из следующих этапов:

- Математическое моделирование технологического процесса в программном комплексе Deform с целью получения базы данных по напряженно-деформированному состоянию заготовки за весь период обработки.

- Постпроцессорная обработка результатов моделирования с помощью разработанной подпрограммы анализа поврежденности.

- Определение накопленной деформации $\bar{\varepsilon}_M$, поврежденности по Делю ψ_M в интересующем сечении.

- Определение остаточного ресурса пластичности материала в интересующей материальной точке $\psi_{рд} = 1 - \psi_M$

- Моделирование опыта на растяжение образца (виртуальный эксперимент) из деформированного материала с заданием достигнутой накопленной деформации $\bar{\varepsilon}_M$ в качестве исходных данных.

- Определение перемещения инструмента ΔL_2 в момент достижения в образце ресурса пластичности ψ , равного $\psi_{рд}$ – остаточному ресурсу после ковки.

– Прогнозирование относительного удлинения по моменту достижения остаточного ресурса пластичности при моделировании опыта на растяжение:

$$\delta = \frac{\Delta L_2}{L_0}.$$

– Прогнозирование предела прочности как частного от деления максимальной силы, достигнутой в виртуальном опыте на начальную площадь образца:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}.$$

Верификация методики производилась для процесса радиальной ковки цилиндрической оси из материала, полученного методом жидкофазного спекания из смеси металлопорошков на основе вольфрама в бойках, имеющих ромбическую форму с углом раствора 155° . Остаточная пористость материала не превосходит 1 %, что позволило считать его компактным.

Расчетная схема процесса приведена на рис. 1. Четыре бойка одновременно деформируют заготовку в радиальном направлении. Левая каретка подпружинена, на правую действует постоянная сила. Между каждым двойным ходом бойков заготовка поворачивается вокруг продольной оси и подается вдоль оси. Продольная и окружная подача соответствовали реальному эксперименту. Весь процесс выполняется более чем за 4000 операций. После 1500 операций процесс переходит в установившуюся стадию. Для обеспечения максимальной симметрии поверхностная сетка КЭ выполнена максимально равномерной. Во время расчета задавалось принудительное локальное переразбиение сетки через каждые 201 шаг расчета.

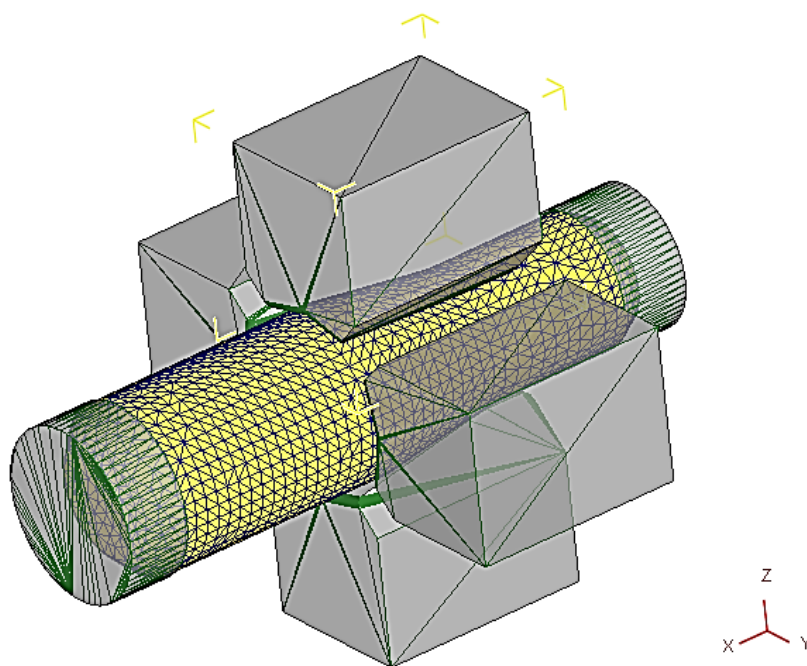


Рис. 1. Расчетная схема процесса радиальной ковки

На рис. 2 приведено распределение накопленных деформаций и поврежденности в продольном сечении заготовки на установившейся стадии процесса. Анализ результатов показывает, что на начальной стадии процесса наблюдаются повышенные значения степени использования ресурса пластичности в центральной части изделия.

В выбранном поперечном сечении на установившейся стадии определили распределение накопленной деформации и поврежденность (рис. 3).

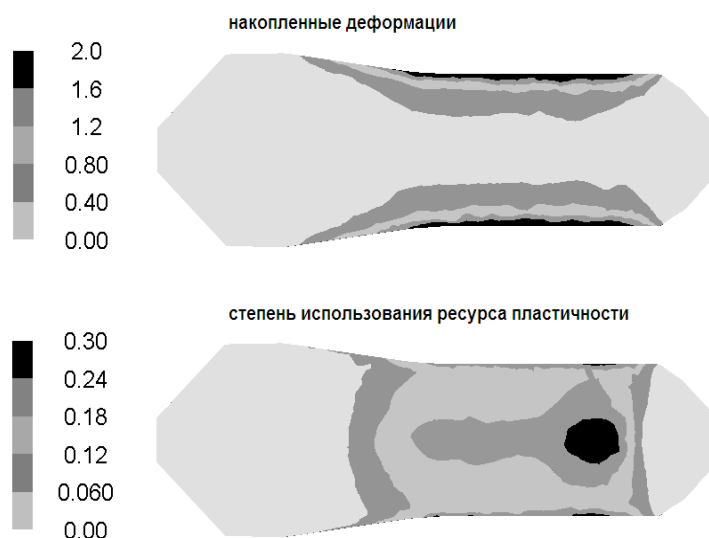


Рис. 2. Распределение накопленной деформации и степени использования ресурса пластичности (поврежденности) по Делю в продольном сечении

При обработке результатов моделирования определены значения накопленных деформаций и поврежденности в 8 виртуальных образцах диаметром $d_0 = 3$ мм, ось которых расположена на расстоянии $0,5R$ от оси изделия¹, где R – радиус заготовки.

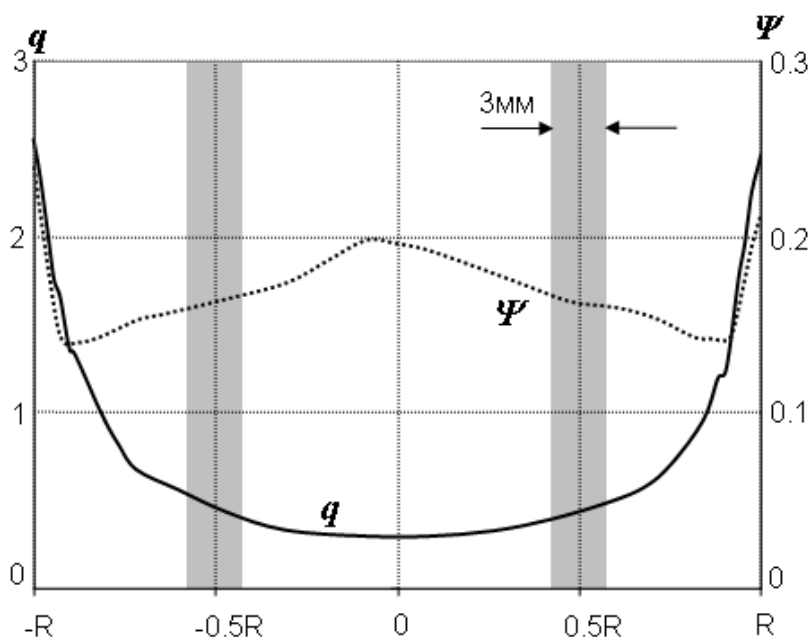


Рис. 3. Изменение накопленной деформации q и поврежденности ψ в поперечном сечении

Расчеты показывают (см. табл. 1), что измеряемые величины распределены по сечению неравномерно: максимум и минимум каждой из величин расположены на внутренней и внешней границах виртуальных образцов. Наиболее существенно по сечению изменяется

¹ Такой выбор виртуальных образцов обусловлен тем, что в натурном эксперименте свойства материала определяли с помощью опытов на растяжение гладких цилиндрических образцов диаметром 3 мм, вырезанных из готовой детали так, что их ось параллельна продольной оси изделия и расположена на расстоянии $0,5 R$ изделия относительно его продольной оси.

накопленная деформация. При виртуальном эксперименте технически очень сложно в качестве исходных данных задать такое неравномерное распределение параметров по сечению в начальный момент. Поэтому при виртуальном опыте на растяжение начальную деформацию образца задавали одинаковой по всему объему.

Таблица 1

Результаты математического моделирования при верификации модели

№ образца	Поврежденность			Накопленная деформация		
	0,5R +1,5мм	0,5R	0,5R -1,5мм	0,5R +1,5мм	0,5R	0,5R -1,5мм
1	0,159	0,163	0,168	0,550	0,466	0,384
2	0,164	0,170	0,171	0,531	0,444	0,391
3	0,168	0,170	0,173	0,492	0,437	0,381
4	0,163	0,168	0,173	0,552	0,454	0,395
5	0,159	0,163	0,169	0,498	0,439	0,381
6	0,167	0,169	0,170	0,486	0,433	0,393
7	0,168	0,169	0,175	0,529	0,434	0,377
8	0,164	0,168	0,171	0,537	0,465	0,393
среднее	0,164	0,168	0,171	0,522	0,447	0,387
отклонение	-2 %		2 %	17 %		-13 %

По результатам моделирования определили прогнозируемую величину накопленной деформации $\tilde{\varepsilon}_k = 0,522$ и прогнозируемую величину поврежденности $\tilde{\psi}_k = 0,171$. В качестве прогнозируемых выбираем максимальные средние величины из таблицы, поскольку разрушение при растяжении в натурном эксперименте будет соответствовать наихудшему сочетанию свойств. Тогда остаточный ресурс пластичности материала:

$$\tilde{\psi}_p = 1 - \tilde{\psi}_k = 1 - 0,171 = 0,829.$$

На последнем этапе реализации методики выполняется виртуальный эксперимент на растяжение образцов, фиктивно вырезанных из готовой детали. Образец имеет форму и размеры, идентичные используемым в натурном опыте на растяжение.

В соответствии с теорией «единой кривой» кривую упрочнения материала считаем такой же, как и при моделировании процессаковки. В качестве исходных данных для моделирования задаем начальную деформацию материала образца равной прогнозу накопленной деформации послековки в интересующем нас сечении $\tilde{\varepsilon}_k = 0,522$.

С помощью разработанной подпрограммы определяем остаточный ресурс пластичности на каждом шаге интегрирования и фиксируем тот шаг, при котором эта величина достигает прогнозного значения $\tilde{\psi}_p = 0,829$. Длина образца для этого момента достигла $\tilde{L} = L_0 + \Delta\tilde{L} = 17,38$ мм (рис. 4), где $\Delta\tilde{L}$ – удлинение образца, равное перемещению инструмента, мм; $L_0 = 15$ мм – база испытаний, используемая в натурном опыте на растяжение. При этом шаге расчета происходит разрушение образца в натурном опыте на растяжение.

Тогда прогноз относительного удлинения в момент разрушения:

$$\tilde{\delta} = \frac{\Delta \tilde{L}}{L_0} \cdot 100\% = \frac{2,38 \text{ мм}}{15 \text{ мм}} \cdot 100\% = 15,9\%$$

Прогноз предела прочности:

$$\tilde{\sigma}_B = \frac{P_{\max}}{F_0} = 1477 \text{ МПа.}$$

Здесь $P_{\max} = 10,44 \text{ кН}$ – максимальная сила, возникающая при виртуальном опыте, $F_0 = 0,25\pi d_0^2 = 7,0686 \text{ мм}^2$ – начальная площадь поперечного сечения образца.

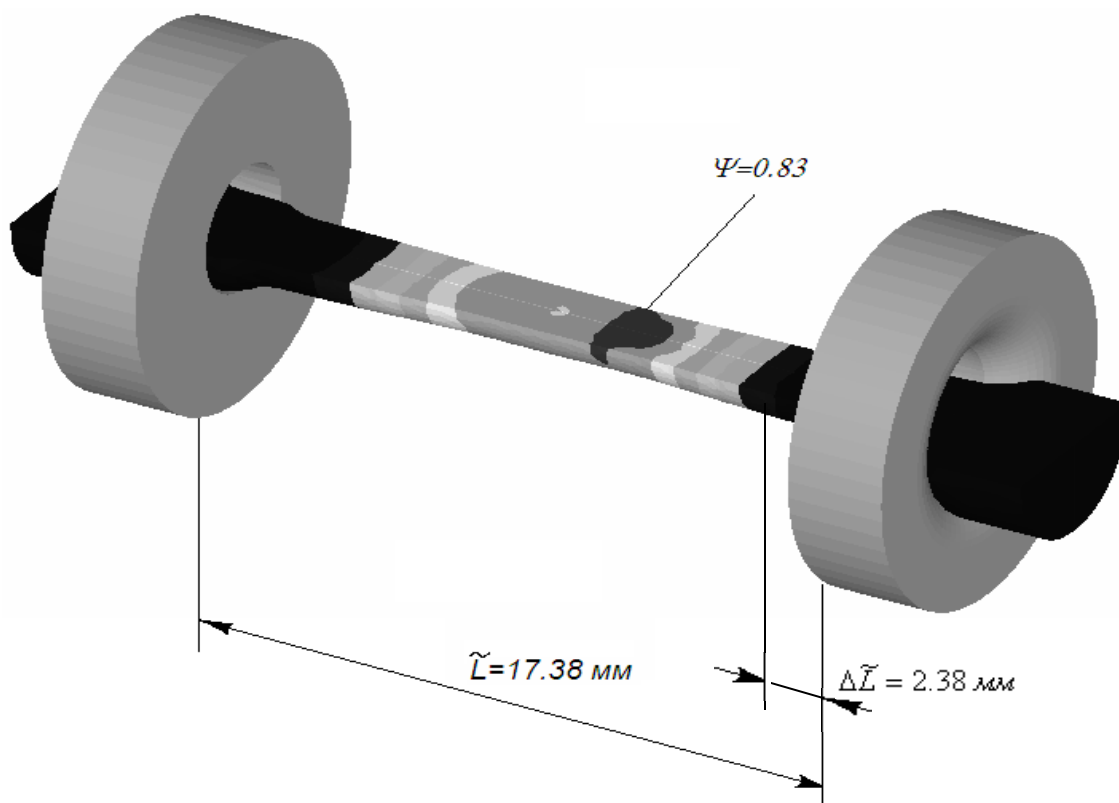


Рис. 4. Распределение поврежденности по Делю в момент разрыва при виртуальных испытаниях на растяжение

Прогнозируемые свойства сравнивали с результатами испытаний свойств материала (табл. 2), полученных после натурнойковки при тех же технологических режимах, форме и размерах инструмента, что и рассмотренное выше моделирование².

Таблица 2

Свойства материала послековки

№ образца	1	2	3	4
σ_B , МПа	1350	1350	1350	1350
δ , %	14,2	12	9,6	15

² Эксперимент выполнен при участии аспирантки Дмитриевой А. Я.

Отклонение прогнозируемых величин от результатов натурального эксперимента, составляет:

по пределу прочности + 9,6 % ;
по относительному удлинению + 6...32 %.

Большой разброс отклонений по прогнозу относительного удлинения может быть объяснен неточностью позиционирования вырезанных для опытов заготовок относительно центра образца, поскольку расчеты показывают существенную неравномерность распределения свойств материала в сечении готовой детали. Это предположение подтверждает и существенный разброс относительных удлинений, полученных в опытах на растяжение. Если отбросить выпадающие значения, то ошибка прогнозирования относительного удлинения не превышает 10 %.

ВЫВОДЫ

Разработанная методика, базирующаяся на конечно-элементном моделировании технологического процесса с последующей обработкой результатов для определения ресурса пластичности (поврежденности) по критерию Г. Д. Деля, с достаточной точностью позволяет прогнозировать прочностные и пластические свойства материала после холодной пластической деформации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Onate E. *Advances of Finite Element Methods and Particle Based Methods for Metal forming processes* / E. Onate // *Steel research Int., Special Edition : 10 Int. Conf. on Tech. of Plast., ICTP11.* – 2011. – P.43–48.
2. Cockcroft M. G. *Ductility and the workability of metals* / M. G. Cockcroft, D. J. Latham // *J. of the Institute of Metals.* – 1968. – № 96ю – P. 33–39.
3. Johnson G. R. *Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain rates, temperatures, pressures* / G. R. Johnson, W. H. Cook // *Eng. Frac. Mech.* – 1985. – № 21. – P. 31–48.
4. *Cflibration and evaluation of seven fracture models* / Wierzbicki T., Bao Y., Lee Y.-W., Bai Y. // *Int. J. of Mechanical Sciences.* – 2005. – № 47. – P. 719–743.
5. Колмогоров В. Л. *Механика обработки металлов давлением* / В. Л. Колмогоров. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ГТУ, 2001. – 836 с.
6. Огородников В. А. *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 174 с.
7. Дель Г. Д. *Пластичность деформированного материала* / Г. Д. Дель // *Физика и техника высоких давлений.* – 1983. – № 11. – С. 28–32.
8. Шестаков Н. А. *Расчеты процессов обработки металлов давлением. Решение задач энергетическим методом* / Н. А. Шестаков. – М. : МГИУ, 2008. – 344 с.
9. *Deformtm 3D Version 6.1 User's Manual.*
10. Власов А. В. *Расчет поврежденности металла при холодной радиальной ковке по результатам конечно-элементного моделирования в программе Deform 3D* / А. В. Власов // *Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и обработки давлением : сборник докладов и материалов IX Конгресса «Кузнец-2009».* – Рязань, 2009. – С. 204–218.

Власов А. В. – д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана.

МГТУ им. Н. Э. Баумана – Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия.

E-mail: anvvlasov@mail.ru