

УДК 621.73:519.233.4:519.254

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМАХ ПРОТЯЖКИ ЗАГОТОВОК С ОБКАТКОЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ БОЙКАХ

Кухарь Владимир Валентинович д.т.н., профессор
Балалаева Елена Юрьевна к.т.н., старший преподаватель
Тузенько Ольга Александровна к.т.н., доцент
ГВУЗ «Приазовский национальный технический университет»
Василевский Олег Викторович старший мастер
ООО «Метинвест – Мариупольский ремонтно-механический завод»

Kukhar V.

Tuzenko O.

Balalayeva E.

State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University»

Vasylevskiy O.

"Metinvest - Mariupol Mechanical Repair Plant"

Аннотация: в статье проведена статистическая обработка результатов экспериментального исследования неравномерности распределения деформаций и напряжений в заготовке при различных режимах кузнечной протяжки с обкаткой в комбинированных бойках, включающая расчет выборочных характеристик результатов измерений. Получены и проанализированы графики распределения интенсивностей деформаций и напряжений, а также коэффициентов жесткости схемы по высоте. Определено, что при фиксированных обжатиях увеличение угла кантовки заготовки вокруг продольной оси приводит к уменьшению общесреднего значения интенсивностей деформации по сечению с возрастанием доли растягивающих деформаций по середине высоты заготовки. При фиксированных величинах угла кантовки возрастание обжатия приводит к увеличению общесредней интенсивности деформации с максимумом по середине высоты очага деформации и уменьшению разброса значений коэффициента жесткости схемы НДС. Установлено, что оптимальным режимом деформирования заготовок с точки зрения минимизации отклонений показателей напряженно-деформированного состояния является режим с углом кантовки 60 градусов и обжатием, составляющим 0,18.

Ключевые слова: кузнечная протяжка, комбинированные бойки, режимы деформации, напряженно-деформированное состояние, экспериментальное исследование, статистическая обработка, выборочные характеристики.

Постановка проблемы

В настоящее время актуальной производственной задачей является разработка инновационных способовковки, которые позволяют интенсифицировать проработку внутренних слоев слитка при незначительных коэффициентах общего укова [1, 2]. Перспективным направлением реализации схем интенсивных деформаций и достижения высокой степени проработки металла является разработка режимов деформирования заготовок при кузнечной протяжке с использованием комбинированных бойков.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [3,4] проведены теоретические и экспериментальные исследования режимов протяжки заготовок в комбинированных бойках применительно к условиям кузнечно-прессового цеха предприятия ООО «Метинвест – Мариупольский ремонтно-механический завод», организованного на базе блока ремонтных цехов ПАО «ММК им. Ильича» (г. Мариуполь). Результаты конечно-элементного моделирования позволили выявить влияние режимов такой обработки на

технологические параметры и показатели напряженно-деформированного состояния (НДС) материала.

Неравномерность распределения показателей НДС по сечению заготовок при различных режимах деформирования заготовок при кузнечной протяжке с обкаткой в комбинированных бойках, вызывающая неоднородность механических свойств изделий, до настоящего времени не изучена.

Цель работы

Целью работы является анализ выборочных характеристик показателей НДС при различных режимах протяжки цилиндрических заготовок с обкаткой вокруг продольной оси в комбинированных бойках.

Методика и материалы исследования

В качестве материалов для эксперимента использовали шесть свинцовых образцов (марка ССу) диаметром $D_0 = 50$ мм и длиной $L_0 = 100$ мм. Каждый образец представлял собой две половинки полукруглого сечения, причем на тыльной стороне одной из них была нанесена координатная сетка с шагом $s = 3$ мм.

В зависимости от режимов обжатия (угла кантовки $\Delta\varphi$, величины обжатия Δd и количества обжатий n до полного поворота заготовки на 360°) экспериментальные образцы были промаркированы и условно разделили на две группы.

В первой группе образцов («0», «1», «2») осуществляли варьирование углом кантовки $\Delta\varphi$ при фиксированной величине обжатия $\Delta d = 5$ мм: образец «0» – $\Delta\varphi = 30^\circ$, $n = 12$; образец «1» – $\Delta\varphi = 60^\circ$, $n = 6$; образец «2» – $\Delta\varphi = 90^\circ$, $n = 4$.

Во второй группе образцов («3», «5», «8») осуществляли варьирование величиной обжатия Δd при фиксированной величине угла кантовки $\Delta\varphi = 60^\circ$: образец «3» – $\Delta d = 5$ мм, $n = 6$; образец «5» – $\Delta d = 6,6$ мм, $n = 6$; образец «8» – $\Delta d = 9$ мм, $n = 6$.

Исследования проводили при относительных величинах обжатий: $\varepsilon_d = \Delta d / D_0 = 0,1; 0,132; 0,18$.

В основу эксперимента положен метод координатной сетки. Перед пайкой двух половинок образцов выбирали столбец ячеек $j = 16$ (рис. 1,а), находящийся на расстоянии $L_0/2$ (затем $L_k/2$) от торца образца. Измеряли начальную высоту ($a_{0i} = 2s$) и ширину ($b_{0i} = 2s$) каждой i -й ячейки данной линии, а после деформирования и распайки – конечные размеры a_{ki} и b_{ki} .

НДС материала в очаге деформации принимали осесимметричным, так как деформирование с обкаткой предполагает преобразование первоначального круглого поперечного сечения заготовки в круглое сечение поковки. Компоненты деформаций в элементарных ячейках вычисляли как

$$\varepsilon_{y_i} = \ln(a_{k_i}/a_{0_i}); \quad \varepsilon_{x_i} = \varepsilon_{y_i}; \quad \varepsilon_{z_i} = \ln((b_{k_i} \cdot \sin \gamma_{k_i}) / (b_{0_i} \cdot \sin \gamma_{0_i})). \quad (1)$$

Компоненты, отвечающие за сдвиг:

$$\bar{\gamma}_{yz_i} = (\varepsilon_{y_i} - \varepsilon_{z_i}) \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{k_i} / (\exp(\varepsilon_{y_i} - \varepsilon_{z_i}) - 1); \quad \bar{\gamma}_{xy_i} = \bar{\gamma}_{xz_i} = 0. \quad (2)$$

Интенсивность деформаций для принятых условий:

$$e_i = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{2(\varepsilon_{y_i} - \varepsilon_{z_i})^2 + 1,5\bar{\gamma}_{xz_i}^2}. \quad (3)$$

Для расчета интенсивности напряжений использовали гипотезу единой кривой, которая устанавливает однозначную функциональную взаимосвязь между интенсивностями напряжений и интенсивностями деформаций. Предварительно были получены аппроксимирующие кривые упрочнения для свинца ССу и стали 12ХНМФА (коэффициент детерминации $R^2 > 0,98$):

$$\sigma_{i(ССу)} = -1987,8e_i^4 + 2664,6e_i^3 - 1354,4e_i^2 + 303,53e - 0,0108; \quad (4)$$

$$\sigma_{i(12ХНМФА)} = -811,41e_i^4 + 1544,1e_i^3 - 1191,3e_i^2 + 462,69e + 50,904. \quad (5)$$

Коэффициенты жесткости схемы НДС определяли по Г.А. Смирнову-Аляеву, при этом

условия деформации принимали монотонными:

$$(\eta_{\sigma})_i = (\sigma_{x_i} + \sigma_{y_i} + \sigma_{z_i}) / \sigma_i; \quad (\eta_{\epsilon})_i = (\epsilon_{x_i} + \epsilon_{y_i} + \epsilon_{z_i}) / \epsilon_i; \quad \eta_i = (\eta_{\sigma})_i = (\eta_{\epsilon})_i, \quad (6)$$

где $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}, \sigma_{z_i}, \epsilon_{x_i}, \epsilon_{y_i}, \epsilon_{z_i}$ – компоненты напряжений и деформаций.

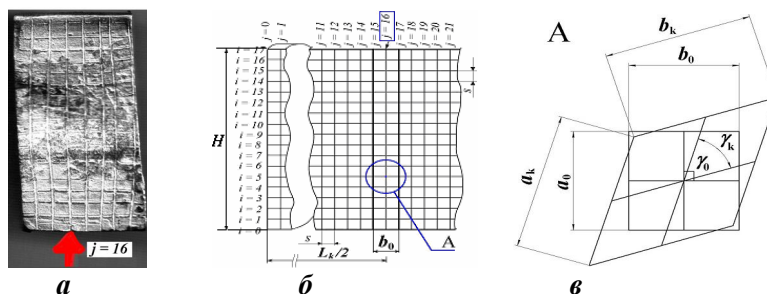


Рис. 1. Экспериментальный образец (а), схема измерений координатной сетки (б), ячейка до и после деформирования (в)

Для осесимметричной деформации рассчитывали коэффициент жесткости:

$$\eta_i = (2\epsilon_{y_i} + \epsilon_{z_i}) / \epsilon_i. \quad (7)$$

После определения показателей НДС для каждой i -ой ячейки образцов «0», «1», «2», «3», «5», «8» рассчитывали для каждого образца среднее выборочное значение (x_{cp}), значение исправленной дисперсии (S_x^2) и среднеквадратическую погрешность результатов измерений (S_x) соответственно [5]:

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{(n-1)}; \quad S_x = \sqrt{D_x}, \quad (8)$$

где x_i – значение параметра ($i = 1, 2, \dots, n$ – номер ячейки; $n = 16$).

Определяли максимальное и минимальное отклонение значений x_i :

$$\Delta x_{\max(\min)} = |x_{\max(\min)} - x_{cp}|. \quad (9)$$

Основные результаты исследования

На основе полученных данных были построены графики распределения интенсивностей деформаций e_i , интенсивностей напряжений для заготовок из свинца $\sigma_{i(CCy)}$ и стали $\sigma_{i(12XHM\Phi A)}$, а также коэффициентов жесткости схемы η_i по высоте. На рис. 2 приведен пример графика распределения интенсивностей деформаций e_i для образца «0» по высоте, при этом использован показатель относительной высоты h_y / D_0 , где h_y – высота по оси y от образующей образца до центра i -й ячейки. Обобщенные результаты вычислений приведены в табл. 1.

Анализ выборочных характеристик показал, что наименьшие отклонения экспериментальных величин от среднего значения достигаются для образца «1», а наибольшие – для образцов «0» и «8».

Для образцов «0», «1», «2» справедливо $e_{i,cp0} < e_{i,cp1} < e_{i,cp2}$; $\eta_{cp0} > 0$, $\eta_{cp1} < 0$, $\eta_{cp2} < 0$. Это свидетельствует о том, что при режимах протяжки с фиксированным обжатием увеличение угла кантовки приводит к общему уменьшению интенсивности деформации и смещению коэффициента жесткости схемы напряженно-деформированного состояния в жесткую область.

Для образцов «3», «5», «8» справедливо $e_{i,cp3} > e_{i,cp5} > e_{i,cp8}$; $\eta_{cp3} < 0$, $\eta_{cp5} < 0$, $\eta_{cp8} < 0$.

Следовательно, при режимах с фиксированным углом кантовки увеличение обжатий приводит к росту интенсивности деформации с лучшей проработкой серединной зоны, при этом коэффициент жесткости схемы напряженно-деформированного состояния находится в мягкой области.

Таблиця 1

Выборочные характеристики показателей НДС образцов

Показ. НДС	Выб. хар-ки	Номер образца					
		«0»	«1»	«2»	«3»	«5»	«8»
e_i	e_{cp}	0,426	0,284	0,187	0,233	0,314	0,458
	S_e^2	0,037	0,089	0,002	0,003	0,023	0,047
	S_e	0,194	0,094	0,049	0,057	0,153	0,217
	Δe_{max}	0,303	0,256	0,103	0,108	0,261	0,385
	Δe_{min}	0,020	0,001	0,003	0,002	0,002	0,006
$\sigma_{i(CCУ)}$	σ_{cp}	21,826	24,523	23,654	24,664	22,990	20,740
	S_σ^2	11,330	0,791	2,070	0,432	6,727	13,569
	S_σ	3,366	0,890	1,439	0,657	2,594	3,684
	$\Delta\sigma_{max}$	4,726	2,783	2,764	1,607	7,308	5,940
	$\Delta\sigma_{min}$	1,091	0,035	0,214	0,072	0,065	1,340
$\sigma_{i(12XHM\Phi A)}$	σ_{cp}	119,427	114,387	103,354	110,187	113,183	119,023
	S_σ^2	79,609	57,757	62,579	47,828	230,274	135,479
	S_σ	8,922	7,600	7,911	6,916	15,175	11,640
	$\Delta\sigma_{max}$	17,492	15,007	13,721	14,797	40,822	33,623
	$\Delta\sigma_{min}$	1,527	0,196	1,364	1,277	2,717	0,523
η_i	η_{cp}	-0,598	-0,598	-1,033	-0,569	-0,442	-0,415
	S_η^2	0,452	1,462	1,462	1,462	1,462	1,462
	S_η	0,672	1,209	1,209	1,209	1,209	1,209
	$\Delta\eta_{max}$	1,618	0,631	0,631	0,631	0,631	0,631
	$\Delta\eta_{min}$	0,048	-1,979	-1,979	-1,979	-1,979	-1,979

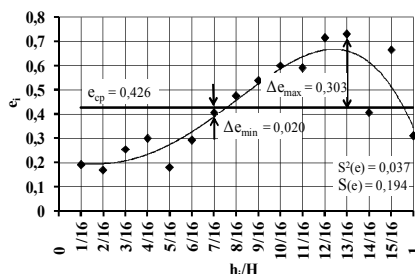


Рис. 2. График распределения интенсивностей деформаций e_i для образца «0» ($\varepsilon_d = 0,1$; $\Delta\varphi = 30^\circ$)

Выводы

Анализируя вышесказанное, следует сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при фиксированных обжатиях увеличение угла кантовки заготовки вокруг продольной оси приводит к уменьшению общесреднего значения интенсивностей деформации по сечению с возрастанием доли растягивающих деформаций по середине высоты заготовки.
2. При фиксированных величинах угла кантовки возрастание обжатия приводит к увеличению общесредней интенсивности деформации с максимумом по середине высоты очага деформации и уменьшению разброса значений коэффициента жесткости схемы НДС.
3. Наилучшие результаты с точки зрения достижения качественной проработки металла по сечению очага деформации показали режимы с углом кантовки $\Delta\varphi = 60^\circ$ и обжатием $\varepsilon_d = 0,18$.

Список литературы

1. Markov O. New technological process of shafts forging / O. Markov // New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. – Czestochowa : Quick-druk, 2012. – P. 414–418.
2. Тюрин В.А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов / В.А. Тюрин // Кузнечно-

штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 11. – С. 15–20.

3. Василевский О. В. Исследование деформированного состояния поковок типа валов при ковке в комбинированных бойках / О. В. Василевский, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск, 2011. – № 3 (28). – С. 78–82.

4. Кухарь В. В. Экспериментальные исследования режимов кузнечной протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / В. В. Кухарь, О. В. Василевский // Вісник Національного технічного університету “ХПІ” : зб. наук. пр. / НТУ “ХПІ”. – Харків, 2013. – Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях, № 43 (1016). – С. 139–148.

5. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

References

1. Markov O. New technological process of shafts forging, New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering, Czestochowa, Quick-druk, 2012, P. 414-418.

2. Tyurin V.A. Innovatsionnyie tehnologii kovki s primeneniem makrosdvigov. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem, 2007, № 11, P. 15-20.

3. Vasilevsky O.V., Grushko A.V., Kukhar V.V. Issledovanie deformirovannogo sostoyaniya pokovok tipa valov pri kovke v kombinirovannyih boykah, Obработка materialov davleniem, DGMA, Kramatorsk, 2011, № 3 (28), P. 78-82.

4. Kukhar V.V., Vasilevsky O.V., 2013. Eksperimentalnyie issledovaniya rezhimov kuznechnoy protyazhki zagotovok s obkatoykoy v kombinirovannyih boykah, Visnik Natsionalnogo tehničnogo universitetu “HPI”, NTU “HPI”, Harkiv, Vol. NovI rIshennya v suchasnih tehnologiyah, № 43 (1016), 2013, P. 139–148.

5. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika, M., Vyisshaya shkola, 2003, 479 p.

НЕРІВНОМІРНІСТЬ РОЗПОДІЛУ ПОКАЗНИКІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ РЕЖИМАХ ПРОТЯГУВАННЯ ЗАГОТОВОК З ОБКАТУВАННЯМ У КОМБІНОВАНИХ БОЙКАХ

Анотація: у статті проведена статистична обробка результатів експериментального дослідження нерівномірності розподілу деформацій і напружень у заготовці при різних режимах ковальського протягування з обкаткою в комбінованих бойках, що включає розрахунок вибіркової характеристики результатів вимірювань. Отримано і проаналізовано графіки розподілу інтенсивностей деформацій і напружень, а також коефіцієнтів жорсткості схеми по висоті. Визначено, що при фіксованих обчисленнях збільшення куту кантування заготовки навколо поздовжньої осі призводить до зменшення загальносереднього значення інтенсивностей деформацій по перетину зі збільшенням частки деформацій розтягу по середині висоти заготовки. При фіксованих величинах куту кантування збільшення обчислення призводить до збільшення загально середньої інтенсивності деформацій с максимумом по середині висоти осередку деформації та зменшення розкиду значень коефіцієнта жорсткості системи НДС. Встановлено, що оптимальним режимом деформації заготовок з точки зору мінімізації відхилень показників напружено-деформованого стану є режим із кутом кантування 60 градусів і обчисленням, яке дорівнює 0,18.

Ключові слова: ковальське протягування, комбіновані бойки, режими деформації, напружено-деформований стан, експериментальне дослідження, статистична обробка, вибіркові характеристики.

THE IRREGULARITY OF DISTRIBUTION OF STRESS-STRAIN STATE INDEXES DURING RESOURCE SAVING MODES OF STRETCH FORGING OF BILLETS WITH ROTATION IN COMBINED ANVILS

Summary: statistical analysis of the results of experimental research of irregularity of distribution of deformations and stresses in billet during different modes of stretch forging with turning in combined anvils includes calculation of sample characteristics measurements. The experiment was based on the method of grid. Experimental materials were six lead samples, consisting of two halves with the applied coordinate grid. Intensity of deformation and stresses and also stiffness coefficients scheme were calculated for the middle column of cells. Graphics of distribution of intensity of deformation and stresses and also stiffness coefficients adjustment scheme are obtained and analyzed. The experimental method of determination of the influence of stretch forging on the distribution of stress-strain state indexes in cross section of billets are developed.

Keywords: stretch forging, combined anvils, deformation modes, stress-strain state, experimental investigation, statistical processing, irregularity of deformation.