

О.С. Кошелев, В.В. Галкин, С.А. Кудрявцев, Е.Н. Хохлов, Е.Г. Терещенко  
(Нижегородский государственный технический университет)

## Деформация материала в головке болта при холодной высадке

*Представлены результаты исследования деформированного состояния материала в технологических переходах при получении болта с головкой типа "TORX". Оценка проведена методами математического моделирования с применением программного комплекса DEFORM и натурных исследований. Получены данные о форме локализации деформированного состояния на переходах высадки и количественных показателях перлитной составляющей в зависимости от величины деформации.*

*The article describes the researches results of deformed condition of the material through the machining steps of manufacture of the bolts with "TORX" type boltheads. The researches developed by the mathematic modeling with use of the bundled software DEFORM and environmental tests. The data on the form of localization of the deformed condition through the machining steps of upset and quantity of the perlite depending on the rate of deformation have been covered.*

При высадке стержневых крепежных изделий (КИ), как правило, стандартными переходами являются набор, осадка, формовка предварительная и формовка наружного или внутреннего контура (профиля) головки.

Спецификой любой холодновысадочной операции является неравномерность деформации. Это, с одной стороны, влияет на стойкость инструмента на переходе, а с другой — на окончательные механические свойства КИ, не всегда благоприятные. Поэтому исследование деформированного состояния в объеме готового изделия и в процессе его формирования, определяемое построением переходов, — задача актуальная.

Одним из основных методов определения значений местных деформаций является их оценка через величину упрочнения. Для этого по плоскости продольного сечения головок по переходам изготавливают шлифы и на них измеряют твердость материала. По результатам таких замеров строят зависимости распределения (изосклеры) твердости, которые косвенно характеризуют величину упрочнения в соответствующей точке объема.

Значительная трудоемкость указанных процедур и отсутствие возможности непрерывного анализа процесса деформирования не позволяют быстро провести оценку и при необходимости корректировку хода технологического процесса. Появление программных продуктов, обеспечивающих проведение трехмерного моделирования процессов объемной штамповки, данную процедуру упростило. Однако при изменении деформируемых материалов, появлении новых форм изделий, а следовательно, форм и последовательности

переходов, естественно, возникает вопрос о сопоставимости результатов анализа деформированного состояния, полученного с помощью математического моделирования с данными исследований натурных образцов, поскольку это определяет ценность используемого программного продукта для конкретных производственных процессов.

Этим вызвано появление настоящей работы, целью которой стало исследование деформированного состояния материала на переходах высадки (рис. 1) с помощью математического моделирования и натурных исследований на примере высадки головки с фланцем болта М8-6g из стали 20Г2Р. Головка обладает волнистым наружным профилем типа "TORX".

Математическое моделирование проводили с помощью программного продукта DEFORM. Оно включало получение качественной картины распределения эквивалентных деформаций и перевод полученных данных в количественные. Для этого использовали диаграммы упрочнения стали 20Г2Р, полученные при ее стандартных испытаниях на сжатие.

Исследование натурных образцов проводили на шлифах продольных сечений головок по переходам в зонах, определенных при анализе картины распределения эквивалентных деформаций. Порядок проведения работы был следующим:

- проводили замер микротвердости (ГОСТ 9450–76) на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 0,981 Н в плоскости продольного сечения;
- в плоскости продольного сечения анализировали микроструктуру с помощью микроскопа МИМ-7 при увеличении  $\times 340$ ;

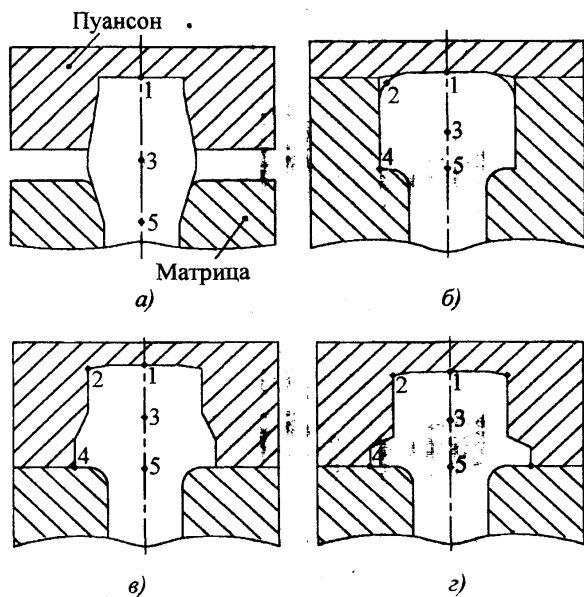


Рис. 1. Схема высадки заготовки болта по переходам:  
 а – набор; б – закрытая осадка в матрице; в – обжатие внешнего диаметра; г – формовка наружного волнистого контура

– с помощью программного продукта "Микроскопия" и библиотеки "National Instruments" (NI) Vision проводили количественный обсчет составляющих феррита и перлита в структуре.

Особенности построения технологического процесса получения головки:

На первом переходе (рис. 1, а) металл набирается в пуансоне и матрице с коническими рабочими полостями. Анализ с помощью математического моделирования динамики течения материала позволяет утверждать, что очаг деформации изменяется в такой последовательности:

– по мере уменьшения высоты части осаживаемого стержня деформируется "свободная" между пуансоном и матрицей часть заготовки; осаживаясь, металл, "растекается" по поверхности контакта инструмента и заготовки и начинает заполнять цилиндрические углубления в конических полостях инструмента;

– пока относительная длина высаживаемой части заготовки  $l_1/d > 2$ , очаг деформации представляет сомкнутые попарно вершинами (одна пара у одной контактной площадки инструмента и заготовки, другая – у другой) четыре конуса. Основания конусов не совпадают с границами контакта заготовки с инструментом, составляя с плоскостью контакта углы около  $45^\circ$ ;

– по мере продолжения движения инструмента начинают заполняться конические части инструмента и очаг деформации все больше характеризуется формой

конической части инструмента; вместе с тем начинает деформироваться свободная часть заготовки, принимая форму "бочки"; диаметр заготовки в зоне переходов конусов в бочку увеличивается, а длина высаживаемой части уменьшается;

– в конце перехода очаг деформации принимает форму сомкнутых вершинами двух конусов. Внутри объема можно выделить наиболее деформированную область с величиной, эквивалентной деформации  $\varepsilon_{эк} = 0,4$ .

На втором переходе (рис. 1, б) проводят закрытую осадку заготовки в матрице. Вначале деформируются слои средней части высоты набранной головки. После касания заготовкой стенок внутреннего контура матрицы осаживается верхняя часть заготовки. Оформление нижней части матрицы и внешних углов происходит в последнюю очередь за счет выдавливания материала из центральной зоны головки и за счет того, что на начальных этапах формирования головки часть материала имеет возможность "выдавливаться" в стержневую часть изделия.

В начале перехода очаг деформации представляет собой два конуса с соприкасающимися вершинами, причем конус, соприкасающийся своим основанием с верхней частью инструмента (пуансоном), по мере осадки больше увеличивается в размерах в силу того, что его основание опирается на жесткую поверхность пуансона. Далее по мере увеличения деформации зона локализации трансформируется, принимает форму тороидальной фигуры, расположенной в нижней внешней части осаживаемой заготовки.

На третьем переходе (рис. 1, в) происходит обжатие верхней части заготовки на меньший диаметр и частичная формовка фланца. Третий переход, как и второй, можно разделить на две части. В начале происходит обжатие верхней части заготовки, которое сопровождается ее подъемом за счет обратного выдавливания, после чего нижняя часть начинает выдавливаться во фланец.

На четвертом переходе (рис. 1, г) выполняют формовку наружного волнистого профиля с окончательной формовкой фланца. Поверхность очага деформации достаточно близко соответствует наружной поверхности высаживаемого болта.

При рассмотрении картины распределения деформаций выделены и отмечены точками следующие зоны очага деформации (см. рис. 1):

- центр контакта заготовки с пуансоном (точка 1);
- средняя зона (точка 3);
- зона перехода головки в стержень (точка 5);
- верхний внешний угол заготовки (точка 2);
- нижний внешний угол заготовки (точка 4).

В исходной заготовке зерно перлита имеет удлиненную форму, у которой среднее отношение длины  $l$  к ширине  $b$  имеет значение  $m = l/b = 2,5$ .

Анализ микроструктуры в выделенных зонах показал, что с изменением степени деформации  $\epsilon_{эк}$  длина  $l$ , ширина  $b$  и относительный размер  $m$  перлитной составляющей изменяются (см. таблицу).

В точке 1 на первом и втором переходах деформация практически отсутствует и относительный размер зерна  $m = 2,52...2,65$  практически не изменяется по сравнению с исходным значением. На третьем переходе при обжатии диаметра происходит уменьшение длины зерна до относительного размера  $m = 1,86$  при  $\epsilon_{эк} = 0,6$ , а на четвертом переходе оно вновь увеличивается до  $m = 2,69$ .

В точке 3, в центре осаживаемой головки, на первом и втором переходах зерно деформируется перпендикулярно продольной оси изделия и относительный его размер уменьшается до значений:  $m = 1,86$  при  $\epsilon_{эк} = 0,4$  и  $m = 1,15$  при  $\epsilon_{эк} = 0,6$ .

В последующих двух переходах, когда преобладает радиальное обжатие, относительный размер зерна увеличивается соответственно до значений  $m = 1,44$  и  $m = 1,94$ .

В точке 5 на первом переходе зерно изменяется до относительного размера  $m = 2,12$  и остается неизменным на втором и третьем переходах, и лишь на последнем происходит увеличение длины зерна до величины чуть большей исходной.

В точке 2 на втором переходе в зоне при формовке верхних углов уменьшение относительного размера зерна максимально и имеет значение  $m = 0,92$ . На третьем переходе при преобладании обратного выдавливания происходит резкое увеличение размера зерна до  $m = 2,47$ , которое в дальнейшем на четвертом переходе вновь уменьшается до  $m = 1,13$ .

В точке 4, соответствующей нижнему внешнему углу, на всех переходах происходит уменьшение относительного размера зерна до  $m = 0,93...1,1$ ; при этом меньшее значение соответствует второму переходу.

Несмотря на то что для объективной оценки необходимо замеры размеров зерна проводить в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях и одной под углом  $45^\circ$ , приведенные данные указывают на влияние преобладающей схемы деформации — осадки или растяжения — на размер зерна.

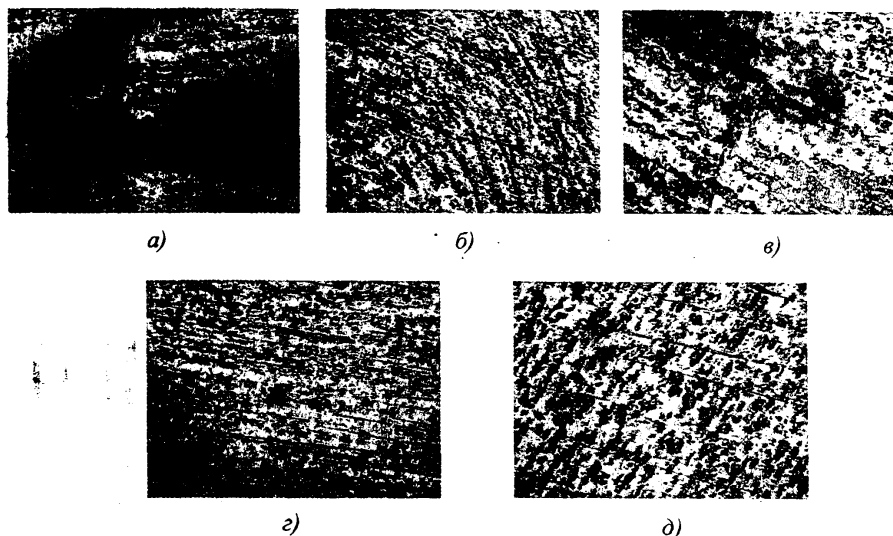
В таблице приведены и результаты замеров твердости по Викерсу в выделенных деформированных зонах, а на рис. 2 — их микроструктура.

Обобщенные результаты эксперимента для различных сечений высаженных головок по переходам

Номер перехода — номер точки	Деформация $\epsilon_{эк}$	Твердость HV	Количество перлита в структуре, %	Среднее значение длины зерна $l$ , мкм	Среднее значение ширины зерна $b$ , мкм	Площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	Относительный размер зерна перлита $m = l/b$
I-1	0	190	62,7	25,2	9,5	726	2,65
I-3	0,4	236	77,9	17,1	9,2	499	1,86
I-5	0,3	221	72,9	25	11,8	553	2,12
II-1	0,1	190	62,7	26,5	10,5	779	2,52
II-2	0,9	236	77,9	9,2	10,0	1137	0,92
II-3	1,2	254	83,8	21,3	18,6	1046	1,15
II-4	1,5	236	77,9	11,8	12,7	487	0,93
II-5	0,9	236	77,9	21,3	9,4	359	2,27
III-1	0,6	193	62,7	17,7	9,5	524	1,86
III-2	1,3	274	90,4	21	8,5	670	2,47
III-3	1,2	254	83,8	30,3	21,1	960	1,44
III-4	1,5	276	91,1	30,5	25,0	938	1,22
III-5	1,0	236	77,9	20,7	9,4	619	2,27
IV-1	0,9	206	68,0	31,7	11,8	748	2,69
IV-2	1,2	236	77,9	15,4	13,6	565	1,13
IV-3	1,3	254	83,8	21,9	11,3	1000	1,94
IV-4	1,5	254	83,8	22,9	20,9	912	1,10
IV-5	1,0	236	77,9	28,2	10,2	679	2,77

Рис. 2. Микроструктура заготовки по переходам,  $\times 340$ :

*a* – первый переход, точка 1, микротвердость 190 HV, относительный размер зерна перлита  $m = 2,65$ ; *b* – второй переход, точка 2, микротвердость 236 HV,  $m = 0,92$ ; *в* – второй переход, точка 3, микротвердость 254 HV,  $m = 1,15$ ; *г* – третий переход, точка 2, микротвердость 274 HV,  $m = 2,47$ ; *д* – четвертый переход, точка 4, микротвердость 254 HV,  $m = 1,1$



По значениям деформаций  $\epsilon_{эк}$  и микротвердости HV построена зависимость  $\sigma_i = f(\sigma_{эк})$ , где  $\sigma_i$  – напряжение текучести (рис. 3), рассчитанное по выражению

$$\sigma_i = (0,32...0,35) HV.$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Кривая упрочнения  $\sigma_i = f(\epsilon_{эк})$ , полученная математическим моделированием и структурными исследованиями, подобна кривой упрочнения  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ , полученной при стандартных испытаниях на сжатие.

Размеры зерна перлита неоднозначно влияют на микротвердость HV: твердость увеличивается, когда зерно приобретает удлиненную форму с относительным размером  $m < 0,4$  или  $m > 1,2$ .

Деформированное состояние материала в процессе высадки стержневых крепежных изделий характеризуется неравномерностью на всех переходах.

Подтверждается тезис о том, что форма зоны локализации деформации определяется, в том числе, и поверхностью контакта заготовки с инструментом.

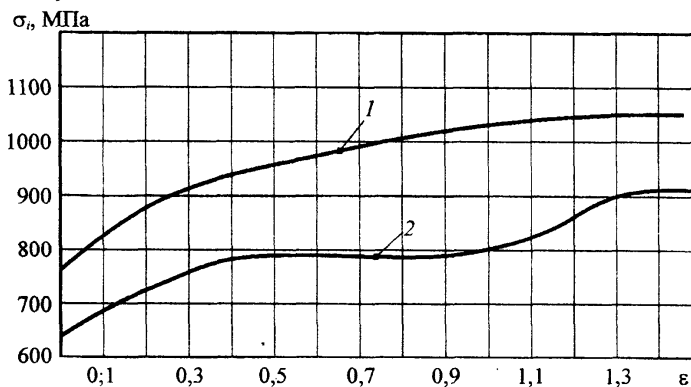


Рис. 3. Диаграммы упрочнения стали 20Г2Р:

1 –  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ , полученная при испытаниях на сжатие; 2 –  $\sigma_i = f(\epsilon_{эк})$ , построенная по результатам замеров твердости и значений эквивалентных деформаций  $\epsilon_{эк}$  из результатов математического моделирования

Величина степени деформации влияет на характер структуры, что выражается в изменении ориентации и размеров перлитной составляющей.

*Олег Сергеевич Кошелев, д-р техн. наук;*  
*Владимир Викторович Галкин, канд. техн. наук;*  
*Сергей Александрович Кудрявцев, канд. техн. наук;*  
*Евгений Николаевич Хохлов, инженер;*  
*Елена Григорьевна Терещенко, инженер*