

УДК 621.778.011:001.891.57

М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Представлено исследование влияния неоднородности структуры на напряженно-деформированное состояние в процессах обработки металлов давлением. Исследование выполнено на примере неоднородности структуры в виде неметаллических включений в процессе волочения стальной проволоки. Приведены результаты металлографических исследований горячекатаной катанки на оптическом микроскопе с количественным анализом неметаллических включений и анализ типа неметаллических включений на растровом электронном микроскопе. Исследование влияния структурной неоднородности на напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе волочения с использованием средств конечно-элементного моделирования позволило определить максимальную суммарную деформацию стальной проволоки в зависимости от распределения неметаллических включений. Выбор метода конечно-элементного моделирования позволил учесть различия структуры и представить проволоку как неоднородное тело с существенно отличными от основного материала механическими свойствами отдельных элементов. Представлены результаты конечно-элементного моделирования процесса волочения стальной проволоки из стали марки 80P по действующему на промышленном предприятии маршруту. Моделирование проведено для трех видов распределения неметаллических включений: в поверхностной, осевой областях и при увеличенном в два раза содержании равномерно распределенных включений по сечению обрабатываемой заготовки. В работе объяснена причина разрушения проволоки после выхода из очага деформации в результате снижения сжимающих напряжений.

Ключевые слова: неоднородность структуры, неметаллические включения, волочение, стальная проволока, микроструктура, количественный анализ, тип неметаллических включений, метод конечных элементов, конечно-элементное моделирование.

M.P. Baryshnikov, M.V. Chukin, A.B. Boiko

Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF STRUCTURAL ON THE STRESS-STRAIN STATE IN THE PROCESS OF PRESSURE TREATMENT

Presented by the study of the effect of heterogeneity on the structure of the stress-strain state in metal forming processes. The study was performed on an example structure inhomogeneity in the form of nonmetallic inclusions in a steel wire drawing process. The results of metallographic examination hot

rolled wire rod in an optical microscope with a quantitative analysis of the nonmetallic inclusions and inclusions type analysis in a scanning electron microscope. Investigation of the effect of structural heterogeneity on the stress-strain state of the workpiece in the process of drawing with the use of finite element modeling to determine the maximum allowed total deformation of steel wire, depending on the distribution of non-metallic inclusions. The choice of the method of finite element modeling allowed to take into account differences in the structure and to provide a wire as an inhomogeneous solid with substantially different from the base material mechanical properties of the individual elements. The results of finite element modeling of the process of drawing steel wire of steel 80r in force at the industrial enterprise route. Simulation is carried out for three types of distribution of nonmetallic inclusions in the surface, in the axial regions and with increased twice content uniformly distributed inclusions in the cross section of the workpiece. The paper explained the reason for the destruction of the wire after leaving the roll gap by reducing the compressive stresses.

Keywords: heterogeneity of structure, nonmetallic inclusions, drawing, steel wire, microstructure, quantitative analysis, the type of non-metallic inclusions, finite element method, finite element modeling.

В условиях постоянной интенсификации производства очень важным является качество заготовки, полученной на каждом предшествующем этапе. Несоответствие механических свойств может стать причиной разрушения заготовки при обработке давлением. Это приводит к дополнительным экономическим издержкам, обусловленным простым оборудованием, отбраковкой заготовки с высокой добавленной стоимостью, а также к повышению вероятности возникновения несчастных случаев с участием технологического персонала. Развитие программных средств и совершенствование вычислительной техники предоставляет возможность проведения испытаний средствами компьютерного моделирования, что позволит предотвратить разрушение заготовки. На свойства материала значительное влияние оказывают неметаллические включения [1, 2]. Для действующих производств ограничения по содержанию включений указаны в технологических условиях, однако полного теоретического и практического обоснования этих норм не приведено, что нередко способствует обрывности заготовки на последующих переделах на волочильных станах вследствие заниженных требований [3, 4], и напротив, перевода качественной продукции в категорию брака или несоответствующей по качеству – в случае завышенных требований к содержанию неметаллических включений.

Для определения количественного содержания неметаллических включений и корректной постановки задачи проведены металлографические испытания горячекатаной катанки стали марки 80P (рис. 1). Оценка количественного содержания проведена с помощью программного обеспечения Thixomet Pro.

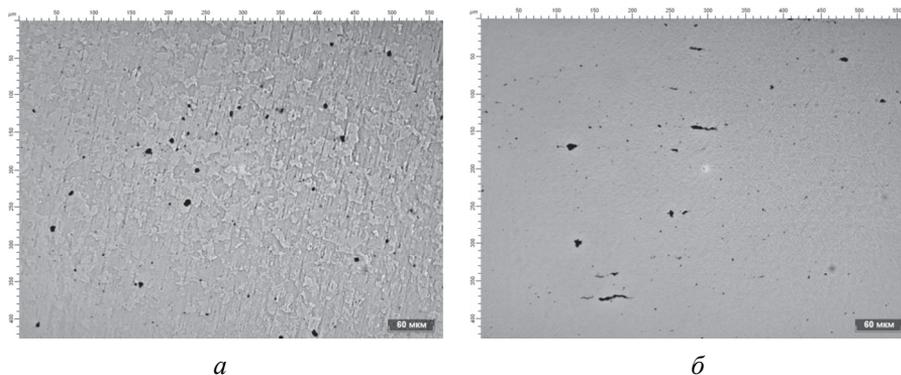


Рис. 1. Микроструктура катанки стали марки 80Р в поперечном (а) и продольном (б) сечениях после горячей прокатки

В поперечном сечении обнаружены неметаллические включения глобулярной формы. Количественным анализом на микрошлифе определено среднее содержание включений – 0,51%. В продольном сечении обнаружены неметаллические включения глобулярной формы, вытянутые по направлению прокатки, количественным содержанием 0,44 %.

В результате исследования микроструктуры, значительного количества пластичных включений и разрушенных в результате деформации вытянутых в сплошные строки включений согласно ГОСТ Р ИСО 4967–2009 не обнаружено. Включения преимущественно представляют собой недеформирующиеся (глобулярные) единичные включения оксидов (рис. 2), в результате чего целесообразно моделирование неметаллических включений при деформации холодным волочением как тел, обладающих упругими свойствами.

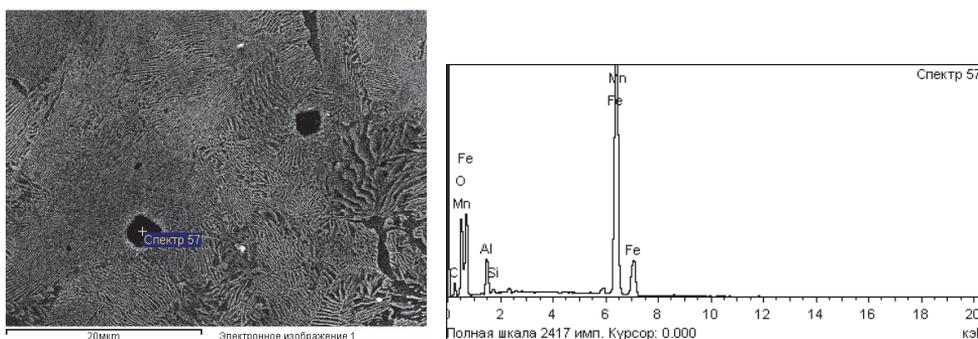


Рис. 2. Электронное изображение и анализ химического состава включения

С целью исследования влияния распределения неметаллических включений по сечению заготовки построены три модели (рис. 3) с преимущественным распределением включений по оси заготовки, в поверхностной зоне и скопление включений (увеличение концентрации включений в два раза).

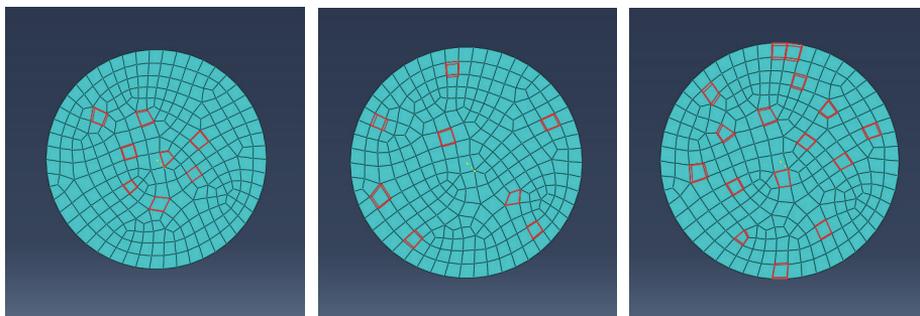


Рис. 3. Распределение неметаллических включений по сечению заготовки: по оси заготовки (а), в поверхностной области (б), с двукратной концентрацией включений (в)

Моделирование волочения проволоки из стали 80P выполнено в программном комплексе Simulia Abaqus [1] по маршруту: 15,5 мм – 14,78 мм – 13,48 мм – 12,38 мм – 11,46 мм – 10,68 мм – 9,98 мм. Волоочильный инструмент принят как абсолютно жесткое тело, геометрия волок построена в соответствии с формой 16 ГОСТ 9453–75. Волоки-заготовки из твердых спеченных сплавов для волочения проволоки и прутков круглого сечения, полуугол волокни 9°. Результаты компьютерного моделирования процесса волочения проволоки представлены на рис. 4–6, для удобства оценки НДС выполнен продольный разрез.

При распределении неметаллических включений в осевой области заготовки наблюдается повышение значений эквивалентных напряжений в непосредственной близости от включений, но запаса прочности достаточно для волочения без обрыва заготовки. Подобное расположение включений обеспечило снижение эквивалентных напряжений в поверхностной области с 984 до 782 МПа (на 20 %) в сравнении с равномерно распределенными неметаллическими включениями. Исследования структуры на развитие трещин [5–9] подтверждают, что неметаллические включения являются концентраторами напряжений и источниками зарождения трещин.

Модель катанки с включениями вблизи поверхности заготовки привела к разрушению заготовки при суммарном относительном обжатии 45,34 % в четвертой волоке, расслоение заготовки произошло вследствие превышения предела прочности материала в поверхностной области вблизи включений, являющихся концентраторами напряжений. Изменение типа разрушения позволяет сделать вывод о зависимости характера разрушения от распределения неметаллических включений по сечению заготовки.

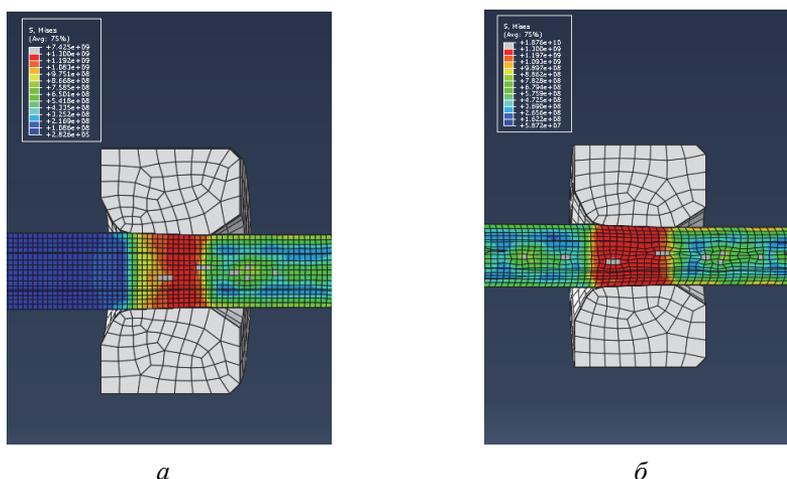


Рис. 4. Распределение НДС по сечению заготовки со скоплением включений в осевой области при волочении в первой (а) и четвертой волоке (б)

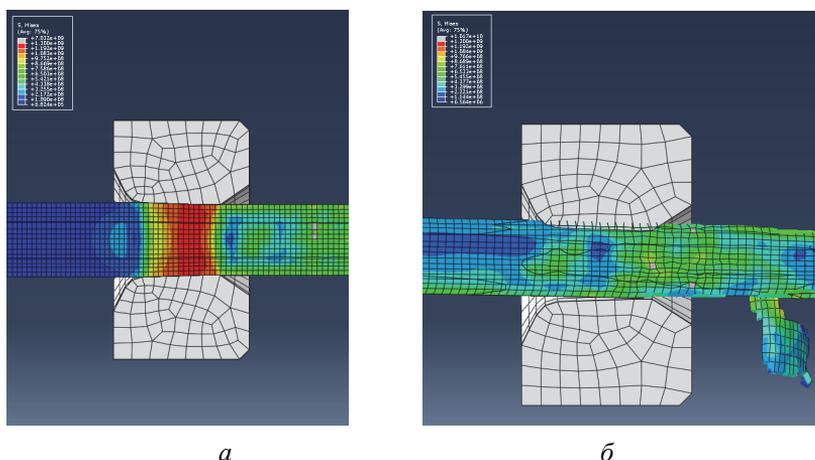


Рис. 5. Модель заготовки с распределением включений в поверхностной области заготовки: а – первая волока (обжатие в волоке 9,07 %); б – четвертая волока (обжатие в волоке 14,31 %)

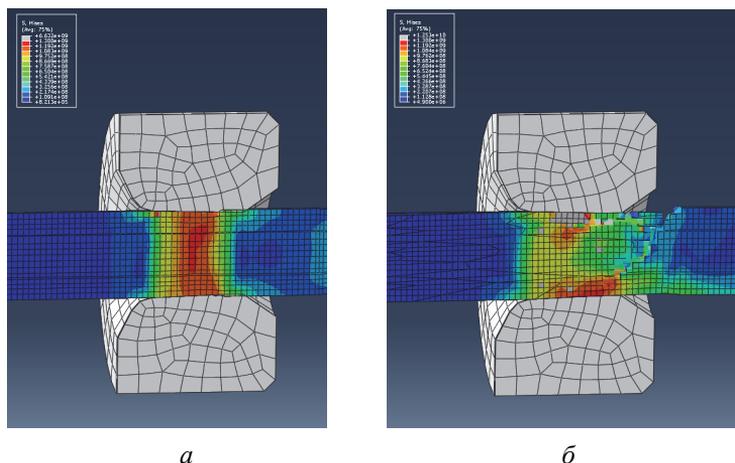


Рис. 6. Модель заготовки с повышенной концентрацией включений при волочении заготовки в первой волоке вне области включений (а), в области включений (б)

Увеличение содержания неметаллических включений в два раза оказало наиболее неблагоприятное воздействие на уровень механических свойств заготовки, в результате чего обрыв произошел на выходе из первой волоки (см. рис. 6) при относительной деформации 9,07 %. Разрыв заготовки в процессе волочения наблюдается на некотором расстоянии от выхода из волоки. Это объясняется наличием сжимающих напряжений в области волоки. После выхода из волоки сжимающие напряжения не оказывает существенного влияния на значение интенсивности напряжений, что приводит к катастрофическому разрушению.

Исследование процесса волочения с целью определения факторов, оказывающих наибольшее влияние на разрушение проволоки, позволило выявить зависимость характера разрушения от распределения неметаллических включений по сечению заготовки. Распределение неметаллических включений в поверхностной области привело к расслоению заготовки из стали 80P при суммарном обжатии 45,34 %. Волочение с неметаллическими включениями при равномерном распределении и в осевой области, по результатам математического моделирования, обеспечило получение арматурной проволоки при суммарном обжатии 58,5 %.

Список литературы

1. Yoshida K., Yamashita T., Tanaka A. Prevention of Wire Breaks in Gold Fine Wire Drawing and Improvement in Wire Straightening. // The 10th International Conference on Technology of Plasticity. – 2011. – P. 297–301.
2. Farrugia D., Cheong B. Multi-scale modelling for studying ductile damage of free cutting steel [Электронный ресурс] // Конференция пользователей Simulia, 2009. – URL: http://www.simulia.com/download/pdf2009/Farrugia_SCC2009.pdf (дата обращения: 10.07.2014).
3. Виноград М.И. Включения в стали и ее свойства. – М.: Металлургиздат, 1963. – 252 с.
4. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2005. – 536 с.
5. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 4. – С. 72–74.
6. Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения. – М.: Машиностроение, 2007. – 106 с.
7. Blochwitz C., Tirschler W. In-Situ scanning electron microscope observations of the deformation behaviour of short cracks // Materials Science and Engineering. – 2000. – P. 273–276.
8. Influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of heavily cold drawn steel wires / K. Lambrighs, I. Verpoest, B. Verlinden, M. Wevers // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2. – P. 173–181.
9. Мясникова А.А. Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при дуговой сварке // Master's Journal. – 2012. – № 1. – С. 50–54.

Получено 16.02.2015

Барышников Михаил Павлович (Магнитогорск, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Машиностроительные и металлургические технологии» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, e-mail: arcosmag@mail.ru.

Чукин Михаил Витальевич (Магнитогорск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроительные и металлургические технологии» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, e-mail: m.chukin@mail.ru.

Бойко Артем Борисович (Магнитогорск, Россия) – аспирант кафедры «Машиностроительные и металлургические технологии» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, e-mail: boyko.ab@mail.ru.

Baryshnikov Mikhail (Magnitogorsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Department “Engineering and metallurgical technology”, Nosov Magnitogorsk State Technical University, e-mail: arcosmag@mail.ru.

Chukin Mihail (Magnitogorsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Engineering and metallurgical technology”, Nosov Magnitogorsk State Technical University, e-mail: m.chukin@mail.ru.

Boiko Artem (Magnitogorsk, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department “Engineering and metallurgical technology”, Nosov Magnitogorsk State Technical University, e-mail: boyko.ab@mail.ru.