Башков О. В., Ким В. А., Лончаков С. З., Физулаков Р. А., Белова И. В.
O. V. Bashkov, V. A. Kim, S. Z. Lonchakov, R. A. Fizulakov, I. V. Belova

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТАЛИ 12Х18Н10Т**

**STUDY OF DEFORMATION-TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF STEEL 12X18H10T**

Башков Олег Викторович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; тел.: +7 (4217) 24-11-48; + 7 (914) 18-40-78. E-mail: bashkov@knastu.ru.

Mr. Oleg V. Bashkov – Doctor of Engineering, associate professor, head of Material Science and Technology of New Materials department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (4217) 24-11-48; + 7 (914) 18-40-78. E-mail: bashkov@knastu.ru.

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: sinerg@mail.ru.

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of engineering, Professor of Material Science and Technology of New Materials department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sinerg@mail.ru.

Лончаков Сергей Зиновьевич – старший научный сотрудник Центра коллективного пользования (ЦКП) Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Mr. Sergey Z. Lonchakov – Senior Researcher, Center for Collective Use (CCU) Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Физулаков Роман Анатольевич – заместитель начальника отдела новой техники ПАО «Компания “Сухой” “КНААЗ имени Ю. А. Гагарина”», кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: fizulakov@rambler.ru.

Mr. Roman A. Fizulakov – deputy head of department of the New equipment of PJSC Sukhoi Company, PhD in Engineering, associate professor Department of materials science and technology of new materials of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: fizulakov@rambler.ru.

Белова Инна Валерьевна – доцент кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Ms. Inna V. Belova – Associate Professor, Material science and technology of new materials department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по влиянию структурных и технологических факторов на деформационные дефекты, образующиеся при вальцовке тонкостенных труб малого диаметра из стали 12Х18Н10Т, и качество обработки. Показано, что химическая и структурная неоднородность в значительной степени влияет на качество готовых изделий и собранных сопряжений. Экспериментально установлено, что для обеспечения необходимого качества готовых изделий при вальцовке требований, предусмотренных ГОСТ 19277-73 «Трубы стальные бесшовные для маслопроводов и топливопроводов.

Технические условия», недостаточно. Дополнительными условиями обеспечения технологичности материала и заготовок при изготовлении конических участков труб вальцовкой являются размеры и геометрия зёрен, а также предел текучести или твёрдость исходного материала труб. С помощью алгоритмов компьютерной металлографии для количественной оценки микроструктуры были вычислены комплексные показатели структурной организации материала, таких как периметр границ зёрен и их площадь в плоскости сечения металлографического шлифа. Они учитывают размеры и форму кристаллитов, микропор, трещин и других микро- и мезомасштабных структурных объектов и их роль в формировании концентраторов внутренних напряжений. Определена количественная связь между состоянием исходной структуры трубчатой заготовки и механическими свойствами готовой детали. Локальная неоднородность пластической деформации материала связана с характером распределения микроструктурных объектов. Структурная неоднородность материала количественно может быть представлена бинарным полигоном распределения длины периметра и площади микроструктурных объектов, на которой чётко выделяются группы исходных заготовок с высокой и низкой технологичностью. Полученные результаты позволяют осуществлять входной контроль технологичности материала и прогнозировать качество обработки труб вальцовкой.

Summary. The article presents the results of studies of the influence of structural and technological factors on deformation defects produced when rolling thin-walled pipes of small diameter made of 12Kh18N10T steel and the quality of processing. It is shown that the chemical and structural heterogeneity significantly affects the quality of finished products and assembled interfaces. It has been experimentally established that to ensure the required quality of finished products when rolling requirements specified in GOST 19277-73 «Seamless steel pipes for oil and fuel lines. Technical conditions» is not enough. Additional conditions for ensuring the processability of the material and blanks in the manufacture of conical pipe sections by rolling are the dimensions and geometry of the grains, as well as the yield strength or hardness of the raw material of the pipes. Using computer-aided metallography algorithms to quantify the microstructure, complex indicators of the structural organization of the material, such as the perimeter of the grain boundaries and their area in the plane of the section of the metallographic section, were calculated. They take into account the size and shape of crystallites, micropores, cracks and other micro and mesoscale structural objects and their role in the formation of internal stress concentrators. A quantitative relationship between the state of the initial structure of the tubular billet and the mechanical properties of the finished part is determined. The local inhomogeneity of the plastic deformation of the material is due to the nature of the distribution of microstructural objects. Structural heterogeneity of the material can be quantitatively represented by a binary polygon of the distribution of the perimeter length and the area of microstructural objects, on which groups of initial blanks with high and low manufacturability are clearly distinguished. The obtained results allow to carry out the input control of the material's processability and to predict the quality of the pipe processing by rolling.

Ключевые слова: высоколегированная сталь 12X18H10T, деформация, вальцовка, микротвёрдость, аустенитное зерно, балл зерна.

Key words: high-alloy steel 12X18H10T, deformation, rolling, micro hardness, austenite grain, grain size.

УДК 669.295: 621.7

Введение

При развальцовке цилиндрического участка заготовки в конический вид материал подвергается сложной пластической деформации, неоднородно распределённой по толщине и длине обрабатываемой зоны. Формоизменение при развальцовке осуществляется за счёт локального растяжения, при этом учитывается, что получаемое изделие относится к категории ответственных и точных; степень пластической деформации должна иметь строго заданную величину в определённых поперечных сечениях. Численные значения реальной степени пластической деформации можно определить измерением диаметральных размеров полученной детали по формуле

$$e = \ln \left(\frac{d_i}{d_0} \right), \text{ где } d_i - \text{диаметр трубки в } i\text{-ом сечении; } d_0 - \text{исходный диаметр трубки.}$$

Качество формируемого сопряжения будет зависеть от режимов деформационной обработки и исходного состояния заготовки, определяющих структуру готовой детали и его физико-

механические свойства. Исходная трубчатая заготовка обладает структурной и химической неоднородностью, погрешностью размеров и формы, регламентированных соответствующими допусками [7; 6]. В результате свойства получаемого изделия при соблюдении всех технологических режимов и норм могут различаться между собой, и это отражается на эксплуатационных показателях готового сопряжения.

В статье приведены результаты исследований влияния исходной структурной неоднородности трубчатых заготовок из нержавеющей стали 12X18H10T на качество изделия, получаемого развальцовкой.

Методика исследований

Трубчатые заготовки диаметром 6,0 мм, толщиной 1,0 и 0,8 мм из нержавеющей стали 12X18H10T подвергались развальцовке обкаткой тремя роликовыми наконечниками.

Механические свойства исходной заготовки определялись диаграммой растяжения, полученной на испытательной электромеханической машине INSTRON 3382 (США). Химический состав материала определялся оптико-эмиссионным спектроанализатором Q4 TASMAN 170 (Bruker, Германия). Химический состав нержавеющей стали 12X18H10T регламентируется ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки» (п. 2.2. ГОСТ 19277-73 «Трубы стальные бесшовные для маслопроводов и топливопроводов. Технические условия»).

Металлографические шлифы готовились по традиционной технологии и травились реактивом, состоящим из глицерина, соляной и азотной кислот в соотношении 4:4:3 [1]. Цифровые изображения микроструктур были получены на металлографическом микроскопе «Микро-200» при степени увеличения, равной 400 крат. Для анализа структурного состояния материала использовались результаты компьютерной обработки изображений микроструктур с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1 [3; 4]. Компьютерная обработка включала корректировку резкости изображения, калибровку с учётом кратности увеличения, снятие контрастной маски, выделение границ зёрен и раздела фаз, вычитание фона в случае его неоднородности, вычисление периметра (P_i) и площади (S_i) каждого зерна или другого микроструктурного образования.

По результатам измерений количественных показателей P_i и S_i рассчитывалась такая комплексная характеристика, как плотность границ зёрен: $q = \frac{\sum P_i}{\sum S_i}$.

В расчёте использовались все микроструктурные объекты, зафиксированные на одном снимке, общее количество которых составило от 200 до 1200 штук.

Микроструктура материала в исходном состоянии и после обработки исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа HITACHI S-3400N (Япония). На полученных изображениях более чётко выявлялись микроструктурные дефекты и рельеф шлифа, сформированный после его травления. По степени травления можно косвенно судить о величине химического потенциала микроструктурного объекта [5].

Результаты исследований и их обсуждение

На основании механических испытаний исходных заготовок был построен полигон их распределения по пределу прочности и относительному удлинению (см. рис. 1). Выборка включала 16 трубчатых заготовок толщиной 0,8 и 1,0 мм.

Полученное распределение отражает общую закономерность: с повышением предела прочности имеет место снижение относительного удлинения. Сочетание этих двух характеристик определяет технологичность и эксплуатационную надёжность любого материала. Высокий предел прочности обеспечивает эксплуатационную надёжность материала, а низкий – повышенную технологичность. Большая величина относительных удлинений характеризует высокую формоустойчивость и сопротивляемость материала к разрушению при деформации [6].

Заготовки с высокой технологичностью характеризуются относительно низким пределом прочности (или пределом текучести) и повышенной величиной относительного удлинения. Они были объединены в отдельную группу (выделены на полигоне распределения прямоугольной зоной) (см. рис. 1). Остальные заготовки представляли группу с низкой технологичностью.

Рис. 1. Полигон распределения трубчатых заготовок по пределу прочности и относительному удлинению: $\diamond$ – $h=0,8$ мм; $\circ$ – $h = 0,8$ мм

Химический состав материала показал, что заготовки с низкой технологичностью имеют незначительное превышение содержания фосфора относительно рекомендуемого стандартом. Фосфор – вредная примесь, находящаяся в стали в виде соединения Fe_3P и образующая легкоплавкие соединения, скапливающиеся при кристаллизации сплава, как правило, по границам зёрен, ослабляя связь между ними. Фосфор оказывает вредное влияние на механические свойства, придавая стали хрупкость в холодном состоянии (хладноломкость). Наличие фосфора в исследованных образцах стали 12X18H10T в количестве, превышающем предельно допустимую норму согласно ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки», может оказывать влияние на качество вальцовки труб.

Типичные микроструктуры заготовок в исходном состоянии с высокой и низкой технологичностью представлены на рис. 2.

Рис. 2. Микроструктуры образцов:
а – с высокой технологичностью; б – с низкой технологичностью

Исходная микроструктура заготовок с высокой технологичностью характеризуется относительно крупными аустенитными зёрнами, разделёнными границами, имеющими чётко выраженные прямолинейные участки, а тройные стыки имеют углы около 120° . Это всё указывает на то,

что структура отличается равновесностью, то есть рост зёрен от центров кристаллизации проходил с близкими по величине скоростями, а сами кристаллиты имели близкие по величине химические потенциалы.

На фотографиях просматривается кристаллографическая ориентация зёрен и субзёрненная структура, имеющая как полигональные, так и ячеистые субграницы.

Микроструктура заготовок с низкой технологичностью отличается относительно мелким зерном, средний размер кристаллита составляет 10...20 мкм. Границы зёрен плохо протравливаются, что косвенно указывает на их слабую подвижность. Пластическая деформация будет протекать преимущественно за счёт деформационных процессов в кристаллитах, а не путём зернограничного скольжения. Такая пластическая деформация требует больших энергетических затрат, поэтому данная структура показала наиболее высокую величину предела прочности при растяжении. Малое количество тройных стыков с равновесными углами является отражением неоднородности распределения химических потенциалов в смежных кристаллитах. Присутствие в микроструктуре зон активного химического растворения, вызванного травлением, доказывает, что в микроструктуре имеются концентраторы напряжений, расположенные преимущественно по границам зёрен и образующие параллельную полосчатость. Такое распределение концентраторов напряжений характерно для структур, получаемых прокаткой, в которых внутренние напряжения не были минимизированы последующей термической обработкой. В целом такую структуру исходной заготовки можно охарактеризовать как плотную, обладающую высокими прочностными свойствами, но плохо поддающейся пластической деформации.

На рис. 3 показана микроструктура, полученная в результате развальцовки в области максимальных пластических деформаций. Структура образцов с высокой технологичностью после деформации отличается однородностью, отсутствием несплошностей и микротрещин как на поверхности, так и в глубине. В слоях, примыкающих к внутренней поверхности, видна текстура деформации, ориентированная параллельно оси деформации. Пластическая деформация вдоль поверхности раскатки носит однородный характер, а по глубине – градиентный. Характер изменения деформации по глубине можно проанализировать по плотности линий текстуры. Текстурные линии травления также могут наблюдаться на образцах, подверженных циклической деформации [2]. Более высокая плотность текстуры у поверхности обеспечивает за счёт деформационного упрочнения высокую прочность контактных поверхностей в формируемом сопряжении, что также повышает качество самой развальцовки. В результате развальцовки формируется качественное сопряжение.

Рис. 3. Микроструктуры образцов после развальцовки в зоне наиболее высокой пластической деформации: а – с высокой технологичностью; б – с низкой технологичностью

Отличительной особенностью микроструктур, сформированных пластической деформацией заготовок из группы с низкой технологичностью, является высокая плотность концентраторов напряжений и микротрещин, ориентированных параллельно плоскости обкатки раскатными роликами. В поверхностной зоне выделяется верхний слой, в котором наблюдаются следы наиболее активных пластических деформаций. Этот слой отличается повышенной концентрацией зон активного вытравливания, расположенных в ряд параллельно поверхности развальцовывания, и мелкозерненным строением. Под этим слоем располагаются вытянутые зоны активного травления и, возможно, микротрещин, которые, к сожалению, не поддаются идентификации. Далее следует широкая область со следами активной пластической деформации. Если в верхнем слое зернистость и кристаллографическая ориентация кристаллитов не просматривается из-за высокой пластической деформации, то в нижних слоях видны сильно деформированные зёрна, среди которых встречаются такие, у которых видна их кристаллографическая ориентация.

Неоднородность пластической деформации проявляется в локальности этого процесса по глубине в виде слоёв, параллельных плоскости развальцовки. Низкое качество обработки определяется низкой пластичностью исходной структуры, образующей при пластической деформации несплошности разномасштабных уровней и множество концентраторов напряжений.

Для количественного описания структурной организации материала были построены полигоны распределения микроструктур объектов исходных заготовок по их периметрам и площадям, что и изображено на рис. 4.

Рис. 4. Распределение площадей и периметров зёрен: ○ – микроструктуры с высокой пластичностью; ■ – микроструктуры с низкой пластичностью

Полученные результаты наглядно демонстрируют отличительную особенность структурной организации материалов. Видно, что диапазон распределения зёрен микроструктуры с высокой пластичностью по периметру отличается незначительно, а по площадям характеризуется большими значениями. На основании приведённых результатов можно заключить, что высокая пластичность наблюдается у крупнозёрнистых микроструктур, средний диаметральный размер которых превышает 7,0 мкм (площадь более 50 мкм²).

Кристаллиты малых размеров определяют более короткий путь скольжения линейных дефектов кристаллического строения при пластической деформации. Это приводит к повышению прочности материала, усилению его склонности к деформационному упрочнению и снижает технологичность.

Заключение

Качество изделия, получаемого развальцовкой, в значительной степени зависит от исходного состояния структуры заготовки. Неоднородность структурного состояния является основной причиной появления изделий низкого качества или непригодных для использования.

Исходный химический состав стали может оказывать большое влияние на технологичность при пластической деформации и, в частности, на качество вальцовки. Превышение предельного содержания фосфора в образцах труб может являться причиной охрупчивания и образования чешуек (лямелей) при развальцовке труб стали 12Х18Н10Т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
2. Исследование кинетики накопления усталостных повреждений в титановом сплаве методом акустической эмиссии / О. В. Башков, В. А. Ким, А. И. Евстигнеев, А. А. Попкова, Т. И. Башкова // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 4. – С. 41-47.
3. Ким, В. А. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов / В. А. Ким, И. В. Белова, С. В. Золоторева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 4. – С. 43-46.
4. Ким, В. А. Исследование структурных изменений при пластической деформации стали 20 / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. – Т. 82. – № 1. – С. 32-36.
5. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
6. Приоритеты авиационных технологий. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. А. Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 696 с.
7. Inhomogeneity of the hot deformation of austenitic steel / M. V. Temlyantsev, M. V. Filippova, V. N. Peretyat'ko, S. V. Konovalov // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – Is. 4. – P. 255-257.