УДК 669.1.018.29:621.73.04

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНОЙ КОВКИ

А.С. ПЕРЦЕВ, аспирант,
Д.О. ПАНОВ, старший преподаватель,
Ю.Н. СИМОНОВ, доктор техн. наук, профессор
(*ПНИПУ, г. Пермь*)
А.И. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент
(*НГТУ, г. Новосибирск*)

Получена 23 декабря 2013
Рецензирование 25 января 2014
Принята к печати 30 января 2014

Панов Д.О. – 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
e-mail: dimmak-panov@mail.ru

Исследуются закономерности формирования структуры и свойств конструкционной стали 35Х при холодной пластической деформации методом радиальной ковки (РК). Трубные заготовки из стали 35Х перед холодной радиальной ковкой подвергали термическому улучшению. В работе использовали методы металлографического анализа, просвечивающей электронной микроскопии, испытания на одноосное растяжение с определением характеристик прочности и пластичности, а также испытания на ударную вязкость KCU и KCT. Для количественной оценки размеров элементов субструктуры стали 35Х применяли методы статистического анализа. В результате исследований установлено, что холодная РК трубных заготовок из стали 35Х вызывает фрагментацию структуры, растворение сформированной при термическом улучшении карбидной фазы и развитие динамической рекристаллизации. При этом после первого прохода холодной РК средний размер субзерен α-фазы уменьшается с 1500 до 730 нм, а после второго и третьего прохода происходит дальнейшее измельчение субструктуры исследуемой стали до размера субзерен α-фазы 640 и 525 нм соответственно. В результате деформации конструкционной стали 35Х со степенью 55 % предел текучести ($\sigma_{0,2}$) возрастает практически на 50 %, а предел прочности ($\sigma_в$) – на 25 % по сравнению с исходно-термоулучшенным состоянием. При этом характеристики надежности (δ, ψ, KCU, KCT) трубных заготовок из конструкционной стали 35Х незначительно снижаются и остаются на достаточно высоком уровне.

Ключевые слова: радиальная ковка, холодная пластическая деформация, субструктура, предел прочности, предел текучести, ударная вязкость.

Введение

Наиболее перспективным из всех механизмов упрочнения металлических материалов является зернограничнo-субструктурный механизм, который заключается в измельчении характерного структурного элемента [1]. Данный механизм вызывает одновременное повышение уровня характеристик прочности и сопротивления хрупкому разрушению.

Существует много способов измельчения структуры металлических материалов – от металлургических до металловедческих, которые позволяют повысить характеристики механических свойств недорогих сплавов, например углеродистых и низколегированных сталей [2]. Однако получение заготовок с ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структурами этими методами в промышленных масштабах не всегда представляется возможным. В связи с

этим разработка подходов к получению таких материалов в промышленных условиях является важной и актуальной задачей.

Измельчение структуры конструкционных сталей с помощью метода холодной пластической деформации возможно при реализации процессов наклепа, повышении плотности дислокаций в исходной структуре металла и последующей первичной рекристаллизации с целью образования зерен с большеугловыми границами. Совмещение этих процессов во время деформации возможно при реализации мегапластической (интенсивной) пластической деформации [3].

Одной из технологий, которые позволяют получить большие степени деформации в промышленных условиях, является радиальная ковка (РК), которая применяется для изготовления высокоточных длинномерных поковок различного сечения и профиля. Высокая дробность деформации при РК достигается за счет применения специальной конструкции инструмента: вырезные фасонные бойки с радиусом выреза, близким к радиусу поперечного сечения исходной заготовки. При ковке происходит многократное перекрытие очагов деформации, а действительная степень деформации существенно превышает расчетную [4].

Таким образом, целью данной работы является исследование закономерностей формирования структуры и свойств конструкционной стали в зависимости от режима обработки при холодной пластической деформации методом РК.

Материалы и методики исследования

В качестве материала исследования выбрана конструкционная сталь 35Х следующего химического состава, % (масс.): 0,38 C; 0,25 Si; 0,57 Mn; 0,82 Cr; 0,17 Ni; 0,14 Mo; 0,008 S; 0,006 P.

Трубные заготовки из исследуемой стали подвергали предварительному термическому улучшению. В шахтной печи СШЦМ 6.12/9 осуществляли закалку в воде от температуры 860 °С, время выдержки 30 мин. Далее проводи отпуск в шахтной печи СШО 6.6/700 при 570 °С в течение одного часа с ускоренным охлаждением в воде. Холодное деформирование трубных заготовок реализовывали в три прохода на радиально-ковочной машине SXP-16 с частотой 1000 ударов в минуту, заготовку при этом вращали вокруг своей оси со скоростью 25 оборотов в минуту с суммарной степенью деформации 54 %.

Микроструктуру исследуемых сталей изучали на микрошлифах с использованием светового микроскопа Olympus GX51 с программно-аппаратным комплексом SIAMS700. Число просмотренных полей для одного структурного состояния стали – не менее 5. Для выявления микроструктуры поверхность микрошлифов подвергали травлению в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Тонкую структуру сталей изучали на трансмиссионном электронном микроскопе Technai G2 FEI при ускоряющем напряжении 160 кВ.

Характеристики прочности и пластичности определяли на коротких цилиндрических образцах с начальным диаметром 5 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-73 [72] на универсальной гидравлической системе для статических испытаний «INSTRON-SATEC 300 LX».

Испытания для оценки ударной вязкости проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78. Использовали копер КМ-30, испытания проводили при комнатной температуре, испытывали образцы типа 3 и типа 17 по ГОСТ 9454-78. Для выращивания трещины на образцах типа 17 использовали вибратор Дроздовского; испытания проводили при температуре 20 °С.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для исследования влияния комплексной механотермической обработки стали 35Х трубные заготовки подвергали термическому улучшению для получения структуры сорбита отпуска, которая обладает хорошей пластичностью при комнатной температуре.

Структуру стали 35Х, полученную в трубных заготовках после термического улучшения, можно идентифицировать как высокоотпущенный мартенсит с присутствием избыточной ферритной фазы. Результаты металлографического анализа показали, что вблизи наружной и внутренней поверхностей структура стали несколько отличается. Так, вблизи внутренней поверхности трубы наблюдаются участки феррита в количестве около 25 %, выделившиеся преимущественно по границам бывших аустенитных зерен (рис. 1, *а*). Это можно объяснить низкой

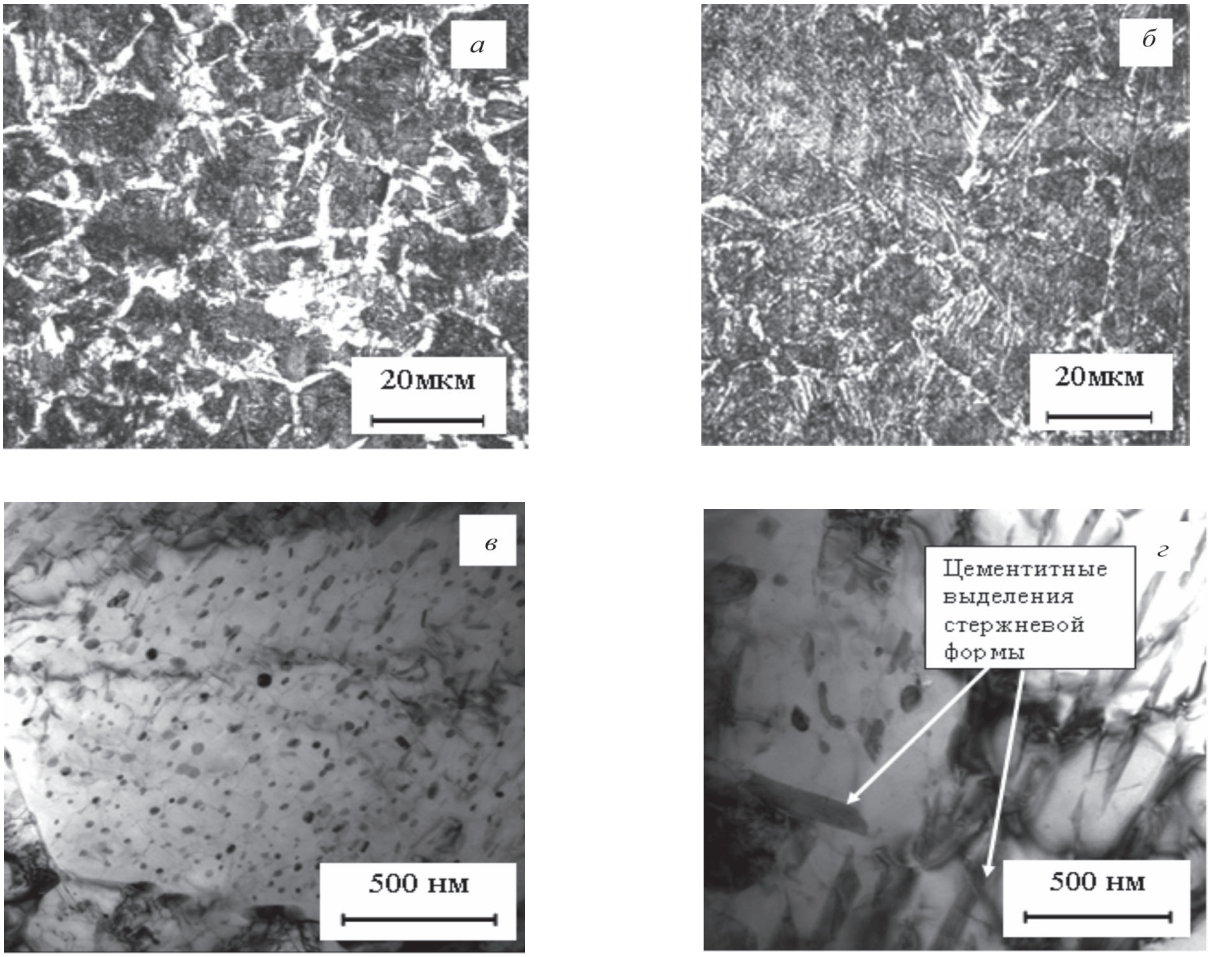


Рис. 1. Микроструктура (*а*, *б*) и тонкая структура (*в*, *г*) стали 35Х после термического улучшения

прокаливаемостью исследуемой стали. Вблизи наружной поверхности трубы структура более однородна и представляет собой также высокоотпущенный мартенсит и феррит в количестве 10 % (рис. 1, *б*).

В тонкой структуре трубной заготовки из стали 35Х после закалки и высокого отпуска присутствует матричная α-фаза и равномерно распределенные сферические частицы цементитного типа (рис. 1, *в*). Вследствие низкой устойчивости переохлажденного аустенита стали 35Х наряду с дисперсной α-фазой в структуре наблюдаются участки избыточного феррита, а также некоторое небольшое количество квазиэвтектоида – сорбита или троостита (рис. 1, *г*). Цементитные выделения в участках квазиэвтектоида имеют не пластинчатую, а стержневую форму.

Был проведен количественный анализ основных структурных элементов и определены следующие характеристики структуры: средний размер субзерна α-фазы сорбита отпуска составил 1,4 мкм, средний размер карбидной фазы равен 55 нм, толщина ферритных и цементитных прослоек в квазиэвтектоиде – 115 и 50 нм соответственно.

В структуре стали 35Х после холодной радиальной ковки стали 35Х со степенью деформации 20 % местами сохраняется реечная субструктура пакетного мартенсита (рис. 2, *а*), а внутри межреечных границ формируются деформационные ячейки, которые дополнительно фрагментируют структуру. Во время первого прохода холодной РК происходит растворение карбидной фазы, выделившейся при отпуске после закалки, и развитие процессов фрагментации как матрицы сорбита отпуска, так и структурно свободного феррита (рис. 2, *б*). Другими словами, происходит фрагментация исходного субзерна на более дисперсные области с широкими границами и малоугловой разориентировкой. Следует отметить, что в структуре стали 35Х после проведения одного прохода холодной РК сохраняются области α-матрицы, в которых признаки фрагментации и образования деформационных полос отсутствуют.

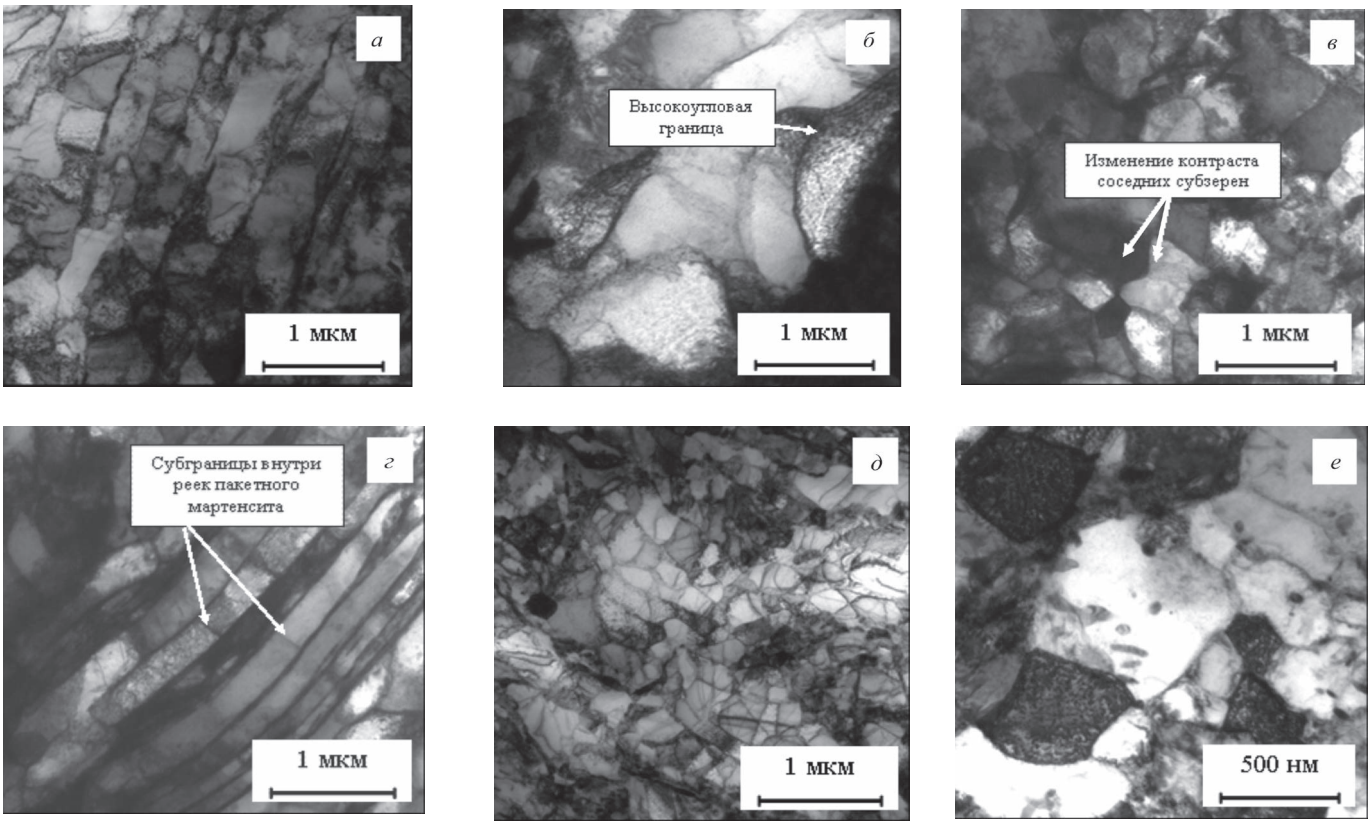


Рис. 2. Тонкая структура стали 35Х после первого (*а*, *б*), второго (*в*, *г*) и третьего (*д*, *е*) прохода холодной радиальной ковкой

В структуре стали 35Х после термического улучшения и одного прохода холодной РК местами также встречаются тонкие границы с характерными толщинными экстинкционными контурами (рис. 2, *б*), что свидетельствует о формировании ультрамелких ферритных зерен с большеугловыми границами при развитии динамической рекристаллизации.

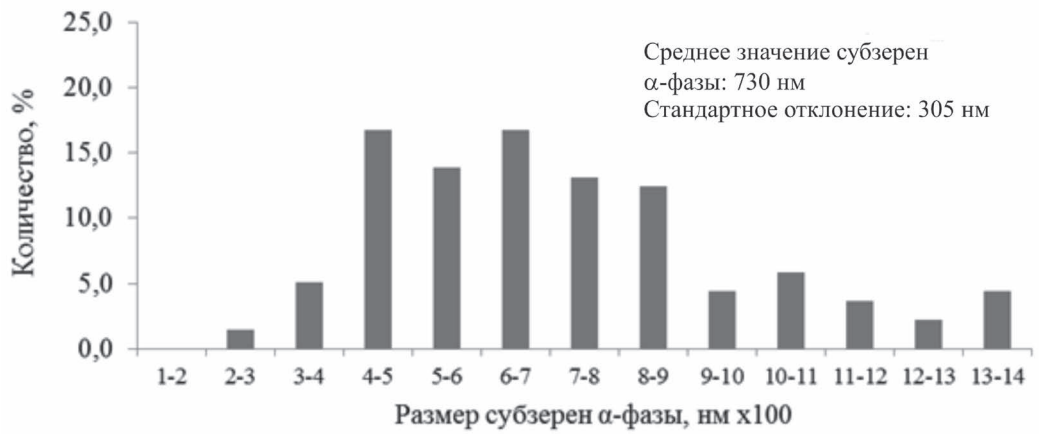
Анализ тонкой структуры стали 35Х после проведения второго прохода холодной РК с общей степенью деформации 40 % показал, что при деформации происходит дальнейшая фрагментация субзеренной структуры, однако стенки ячеек остаются еще достаточно размытыми. Вместе с тем внутри ячеек плотность дислокаций повышается, внутри уже имеющихся ячеек наблюдается формирование еще более мелких субструктурных образований с размытыми субграницами (рис. 2, *в*). Следует отметить, что в структуре стали 35Х после проведения второго прохода холодной РК во всех областях сорбита отпуска наблюдается фрагментация α-фазы. При этом происходит практически полное растворение дисперсной карбидной фазы, выделившейся при отпуске после закалки.

В тонкой структуре после второго прохода холодной РК также встречаются места, где сохранилась субструктура пакетного мартенсита (рис. 2, *г*). В этих местах в результате обработки сформирована полигонизованная структура, что говорит о развитии процессов динамической полигонизации при холодной пластической деформации.

Третий проход холодной РК с общей степенью деформации 55 % вызывает дальнейшую фрагментацию субзеренной структуры, границы ячеек становятся в основном тонкими, четкими, плотность дислокаций внутри ячеек (субзерен) падает (рис. 2, *д*), а областей матрицы, не затронутых фрагментацией, не наблюдается. В тонкой структуре стали 35Х после такой обработки становится больше областей с резким изменением контраста соседних субзерен, т. е. происходит увеличение углов разориетировки между ними (рис. 2, *е*) и продолжают развиваться процессы динамической рекристаллизации.

Статистический анализ структур, полученных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, позволил построить гистограммы распределения субзерен по размерам (рис. 3) после различных режимов холодной пластической деформации.

Распределение для всех представленных режимов – с левой асимметрией. Наибольшая



а

б

в

Рис. 3. Гистограммы распределения субзерен α-фазы по размерам стали 35Х после термического улучшения и последующей холодной РК со степенями деформации 20 % (*а*), 40 % (*б*) и 55 % (*в*)

степень измельчения субструктуры наблюдается после первого прохода холодной РК, так как средний размер субзерен α-фазы уменьшается более чем в два раза – с 1500 до 730 нм по сравнению с исходным термоулучшенным состоянием. Из гистограмм распределения субзерен α-фазы по размерам следует, что увеличение степени деформации приводит к уменьшению среднего размера субзерен α-фазы и уменьшению стандартного отклонения от этого значения, т. е. на втором и третьем проходе холодной РК происходит дальнейшее измельчение субзерен α-фазы до 640 и 525 нм соответственно.

Механические свойства трубных заготовок из стали 35Х после проведения холодной пластической деформации методом радиальной ковки

Холодная пластическая деформация методом радиальной ковки

№ п/п	Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	KCU	KCT
		МПа		%		МДж/м^2	
1	Улучшение	580	780	24	70	1,67	1,05
2	Один проход РК (ε = 20 %)	710	820	26	67	1,63	0,94
3	Два прохода РК (ε = 40 %)	810	905	22	65	1,45	0,88
4	Три прохода РК (ε = 55 %)	865	965	21	65	1,43	0,87

с различными степенями деформации представлены в таблице.

Холодная пластическая деформация методом радиальной ковки приводит к увеличению характеристик прочности конструкционной стали 35Х. Так, за три прохода холодной радиальной ковкой с суммарной степенью деформации 55 % предел текучести $\sigma_{0,2}$ стали 35Х возрастает практически на 50 %, а предел прочности $\sigma_в$ – на 25 % по сравнению с исходно-термоулучшенным состоянием (см. таблицу).

Характеристики пластичности (δ, ψ) при холодной радиальной ковке со степенью 55 % трубных заготовок из конструкционной стали 35Х практически не изменяются. Ударная вязкость KCU и KCT стали 35Х после трех проходов со степенью 55 % снижается в среднем на 15 %, что сохраняет эти характеристики на достаточно высоком уровне (см. таблицу).

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Холодная радиальная ковка трубных заготовок из конструкционной стали 35Х со степенью деформации 20 % вызывает фрагментацию структуры, растворение сформированной при термическом улучшении карбидной фазы и появление тонких границ с характерными толщинными экстинкционными контурами, что свидетельствует о развитии динамической рекристаллизации. Увеличение степени холодной деформации приводит к фрагментации всего объема исследуемой заготовки и дальнейшему развитию процессов динамической рекристаллизации.

2. При количественном анализе тонкой структуры исходно-термоулучшенной стали 35Х после различных режимов деформации установлено, что после первого прохода холодной РК средний размер субзерен α-фазы уменьшается с 1500 до 730 нм. После второго и третьего проходов происходит дальнейшее измельчение субструктуры исследуемой стали до размера субзерен α-фазы 640 и 525 нм соответственно.

3. Холодная пластическая деформация методом радиальной ковки приводит к существенному увеличению характеристик прочности конструкционной стали 35Х: в результате деформации 55 % предел текучести $\sigma_{0,2}$ стали 35Х возрастает практически на 50 %, а предел прочности $\sigma_в$ – на 25 % по сравнению с исходно-термоулучшенным состоянием. При этом характеристики надежности (δ, ψ, KCU, KCT) трубных заготовок из конструкционной стали 35Х незначительно снижаются и остаются на достаточно высоком уровне.

Список литературы

1. *Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М.* Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с.

2. *Кайбышев О.А.* Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.

3. *Глезер А.М., Метлов Л.С.* Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, № 6. – С. 1090–1097.

4. *Тюрин В.А., Лазоркин В.А., Поспелов И.А.* Ковка на радиально-обжимных машинах. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

OBRABOTKA METALLOV
(METAL WORKING • MATERIAL SCIENCE)
N 1(62), January – March 2014, Pages 32–38

The formation of the structure and mechanical properties of the structural steel during cold plastic deformation by radial forging

Pertsev A.S.[1], Post-graduate Student
Panov D.O.[1], Senior Lecturer, e-mail: dimmak-panov@mail.ru
Simonov Y.N.[1], D.Sc. (Engineering), Professor
Smirnov A.I.[2], Ph.D. (Engineering), Associate Professor

[1]Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky pr., Perm, 614990, Russian Federation
[2]Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Received 23 December 2013
Revised 25 January 2014
Accepted 30 January 2014

Abstract

The laws of formation of the structure and properties of structural steel 35X during cold plastic deformation by radial forging (RF) are discussed. Tubular billets were subjected to toughening before cold radial forging. Methods of metallographic analysis, transmission electron microscopy, a uniaxial tension tests with determination of the strength and ductility, as well as the impact tests KCU and KCT were used in the work. Methods of statistical analysis were used to quantitative evaluation the size of the elements of the subgrain structure of steel 35X. The studies found out that the cold RF of steel 35X tubular billets causes structure fragmentation, dissolution of the carbide phase formed by toughening and development of dynamic recrystallization. In this case the average size of α-phase subgrains reduced from 1500 nm to 730 nm after the first pass of cold RF and there is a further refinement of subgrain structure of investigated steel to the size of subgrains α-phase, 640 and 525 nm, after a second and third pass, respectively. The deformation of the structural steel 35X with deformation ratio 55 % results in incensing of the offset yield strenght ($\sigma_{0,2}$) by almost 50 %, and the ultimate tensile strength (σB) – 25 %, compared with the initial condition after the toughening. In this case, the reliability behavior (δ, ψ, KCU, KCT) of tubular billets of structural steel 35X are reduced insignificantly and remained at a high level.

Keywords: radial forging, cold plastic deformation, subgrain structure, strength, yield point, impact toughness.

References

1. Gol'dshtejn M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. *Metallofizika vysokoprochnyh splavov* [Metal Physics high-strength alloys]. Moscow, Metallurgija, 1986. 312 p.
2. Kajbyshev O. A. *Sverhplastichnost' promyshlennyh splavov* [Superplasticity industrial alloys]. Moscow, Metallurgija, 1984. 264 p.
3. Glezer A.M., Metlov L.S. Fizika megaplasticheskoj (intensivnoj) deformacii tverdyh tel [Physics of megaplastic (Severe) deformation in solids]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2010, Vol. 52, no. 6, pp. 1090–1097.
4. Tjurin V.A., Lazorkin V.A., Pospelov I.A. *Kovka na radial'no-obzhimnyh mashinah* [Forging on the radial-pressing machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 256 p.