УДК 621.791:620.1

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ

EFFECT OF DEFECTS ON THE STRUCTURAL AND PHASE STATES AND THE FIELD OF INTERNAL STRESS IN WELDED JOINTS OF CARBON STEEL DURING DEFORMATION

Смирнов Александр Николаевич,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: galvas.kem@gmail.com
Smirnov Alexander N., Dr. Sc.in Engineering, Professor
Ожиганов Евгений Анатольевич,
аспирант, e-mail: zhigan84@mail.ru
Ozhiganov Eugene A., graduate student
Князьков Виктор Леонидович,
канд. техн. наук, доцент, e-mail: vntk50@mail.ru
Knjaz'kov Viktor L., C. Sc.in Engineering, Associate Professor
Абабков Николай Викторович,
канд. техн. наук, доцент, e-mail: n.ababkov@rambler.ru
Ababkov Nikolay V., C. Sc.in Engineering, Associate Professor
Дегтярева Ольга Николаевна,
старший преподаватель, e-mail: don.tma@kuzstu.ru
Degtyareva Olga N., senior lecturer

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Vesennyaya street, 28, Kemerovo, 650000, Russia.

Аннотация. *В работе проведен анализ изменения структуры, фазового состава и значений внутренних напряжений в образцах из стали Ст3сп под действием пластической деформации. Сравниваются результаты исследования образцов с искусственными дефектами и бездефектных образцов, выполненных ручной дуговой сваркой и сваркой модулированным током. Обосновываются предельно допустимые значения пластической деформации при испытания технических устройств повышенным давлением для данных сварных соединений.*

Abstract. *The paper analyzes the changes in the structure, phase composition and values of internal stresses in the samples St3sp steel's under plastic deformation. We compare the results of the study sample with artificial defects and defect-free samples, performed manual arc welding and welding the modulated current. Settle limit values value of plastic deformation during testing of technical devices for high pressure this welded compounds.*

Ключевые слова: *сварка модулированным током, пластическая деформация, искусственные дефекты, поля внутренних напряжений, плотность дислокаций.*

Keywords: *welding the modulated current, plastic deformation, artificial defects, field internal stress, dislocation density.*

До настоящего времени ручная дуговая сварка (РДС) является одним из основных способов соединения различных металлоконструкций, особенно при ремонтных и монтажных работах в сложных условиях. Для снижения влияния человеческого фактора на качество сварки и увеличения производительности труда разрабатываются новые способы дуговой сварки, среди них лидирующее место занимает ручная дуговая сварка модулированным током плавящим электродом (РДСМТ) [1, 2]. Первоначальную оценку качества ремонтных или монтажных работ выполняют проведением испытаний оборудования повышенными нагрузками (повышенным давлением) [3]. Требования к испытаниям регламентированы нормативными документами Ростехнадзора. Однако до настоящего времени, в технической литературе, практически отсутствует информация о физических процессах, протекающих в сварных соединениях при выполнении таких испытаний. Не оценено влияние предварительной нагрузки (деформации) и дефектов сварки на структурно-фазовое

состояние и поля внутренних напряжений в сварных соединениях и, как следствие, на дальнейшую безаварийную эксплуатацию испытанного оборудования. При всей жесткости требований к качеству сварных соединений и к проведению диагностики, в практике нередки случаи повреждений сварных соединений из-за дефектов сварки.

В связи с вышеизложенным, цель настоящей работы заключается в исследовании сварных соединений (дефектных и бездефектных), полученных ручной дуговой сваркой (РДС) и ручной дуговой сваркой модулированным током плавящим электродом (РДСМТ) в исходном состоянии и после различных степеней деформации в зонах термического влияния и наплавленном металле, и в оценке влияния дефектов сварки на структурное состояние металла.

Материал и методики исследования

Исследовали сварные соединения из стали Ст3сп (ГОСТ 380-2005) в состоянии поставки и после деформации 0,5, 2, 3, 5% [4], которые были выполнены РДС и РДСМТ электродами ЦУ-5. Дефекты создавали введением в сварочную ванну порошка алюминия и толченого стекла. Дефекты представляют собой неметаллические включения типа алюминатов, группа В, балл 3, силикатов, группа С, балл 3, ГОСТ Р ИСО 4967-2009. Встречаются отдельные глобулярные оксиды [5], группа DS балл 3 и более. Микротрещин и трещин в металле швов после сварки не выявлено. Методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) анализировали структуру сварных соединений после РДС и РДСМТ в исходном состоянии и после различных степеней деформации [6, 7]. В металле швов исследовали зоны на расстоянии 1,0 мм от линии сплавления (не ближе 1,0 мм от неметаллических включений) и со стороны основного на расстоянии не более 1,0 мм от линии сплавления (ЛС). Механические испытания и предварительную деформацию образцов проводили на машине Walter+Bai AG LFM-125 (Швейцария) со средней скоростью нагружения 18 Н/с.

При исследовании определяли два вида внутренних напряжений: 1) напряжения сдвига (поля напряжений, создаваемые дислокационной структурой) [8]; 2) дальнодействующие напряжения [9, 10] – моментные (или локальные) напряжения, возникающие в тех местах материала, в которых присутствует избыточная плотность (или дислокационный заряд) дислокаций ($\rho_{\pm}$).

Результаты исследований и их обсуждение

В исходном состоянии после РДС бездефектные и дефектные сварные соединения в металле шва и ЗТВ имеют феррито-перлитную структуру В металле шва поврежденный перлит присутствует в отдельных участках материала (менее 1% в дефектных соединениях), в отличии от ЗТВ, где доля поврежденного перлита достигает 5-7% и возрастает с увеличением степени деформации. Феррит – в основном, фрагментированный во всех испытанных образцах. В металле шва, как и в ЗТВ, фрагменты анизотропные. Дислокационная структура во всех морфологических составляющих материала шва представлена, плотными дислокационными сетками. Самая низкая скалярная плотность дислокаций (ρ) в пластинчатом неразрушенном перлите ($1{,}1\cdot10^{10}$ см$^{-2}$), самая высокая – во фрагментированном феррите ($2{,}6\cdot10^{10}$ см$^{-2}$), в нефрагментированном феррите средняя скалярная плотность дислокаций составляет величину $1{,}8\cdot10^{10}$ см$^{-2}$.Дислокационная структура в металле шва, как и в ЗТВ, поляризована. Средняя избыточная плотность дислокаций ($\rho_{\pm}$), измеренная из ширины контуров, во всех морфологических составляющих оказалась практически одинаковой, а именно, в пластинчатом перлите $\rho_{\pm}$ имеет величину $1{,}0\cdot10^{10}$ см$^{-2}$, в нефрагментированном феррите – $0{,}9\cdot10^{10}$ см$^{-2}$, во фрагментированном феррите – $1{,}3\cdot10^{10}$ см$^{-2}$. Наличие искусственных дефектов в металле шва не оказало существенного влияния на структуру ЗТВ, поэтому основное внимание в работе уделено характеристикам структуры наплавленного металла.

В перлите бездефектного металла шва внутренние напряжения сдвига равны 300 МПа, в феррите – 340 МПа, локальные дальнодействующие поля напряжений –305 МПа и 290 МПа соответственно. В ЗТВ амплитуда напряжений сдвига 310 МПа в перлите и 280 МПа в феррите, дальнодействующие поля 290 и 295 МПа соответственно (рис. 1).

В дефектных сварных соединениях, в металле шва амплитуды полей напряжений сдвига близки к напряжениям в бездефектных соединениях, а локальные поля напряжений несколько выше, чем в бездефектных (320 и 310 МПа в перлите и феррите соответственно).

После РДСМТ структура исходного состояния бездефектных и дефектных сварных соединений в металле шва и ЗТВ – феррито перлитная. Объемная доля пластинчатого перлита составляет ~30% от объемной доли материала, феррита – ~70%. Объемная доля фрагментированного феррита от общей доли всего материала шва составляет 65%, нефрагментированного – 5%. В стыках зерен феррита присутствует выделения цементита.

Частицы цементита присутствуют и внутри ферритных зерен, либо в виде отдельных зерен, либо в виде прослоек (рис.2). Скалярная и избыточная плотность дислокаций близки к значениям их после РДС.

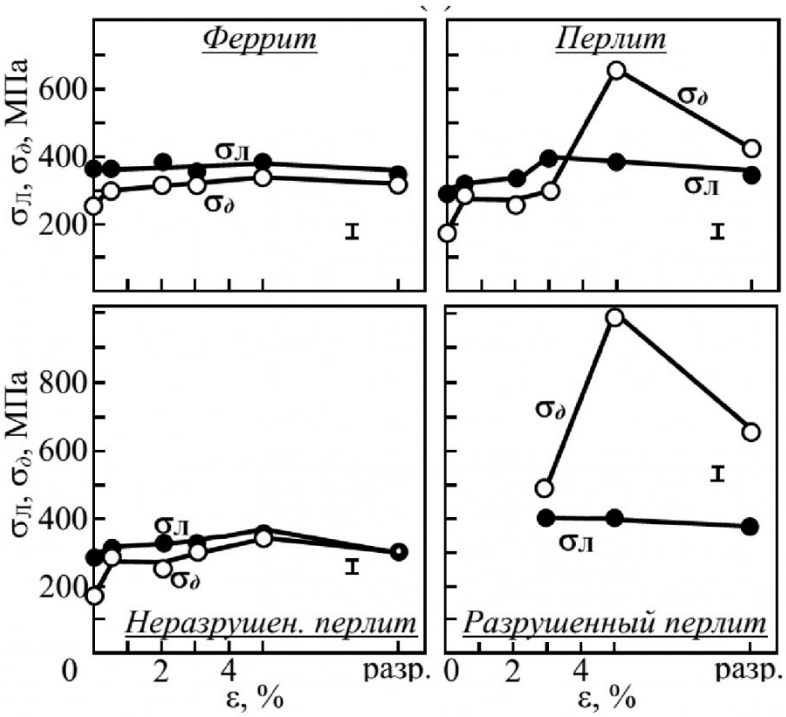

Рис.1. Влияние степени пластической деформации ε на величину внутренних напряжений. РДС без искусственных дефектов

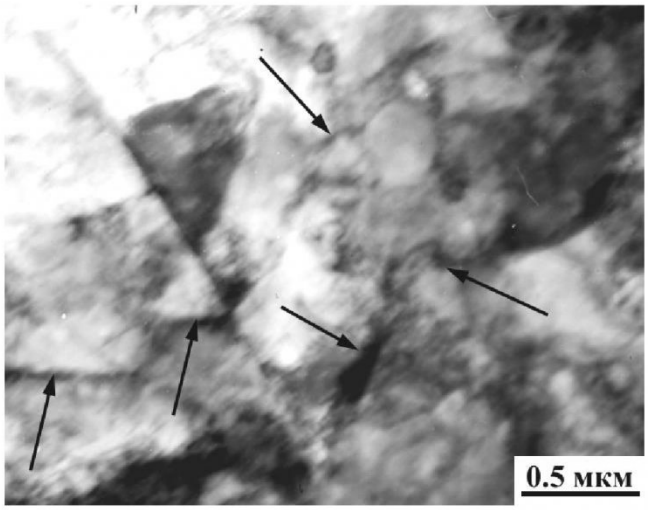

Рис.2. Фрагментированный феррит. Электронно-микроскопическое изображение. РДСМТ без искусственных дефектов. Стрелками отмечены примеры частиц цементита, расположенные по границам фрагментов

В бездефектных сварных соединениях в металле шва внутренние поля напряжений сдвига –280 МПа в перлите и 260 МПа в феррите, а дальнодействующие моментные напряжения –250 и 280 МПа соответственно. В ЗТВ напряжения сдвига равны 310 МПа в перлите и 290 в феррите, локальные моментные напряжения 300 и 280 МПа соответственно.

В дефектных сварных соединениях амплитуды полей внутренних напряжений сдвига и локальных моментных полей внутренних напряжений в шве и ЗТВ практически равны амплитудам в бездефектных соединениях. В зоне линии сплавления напряжения сдвига и поля локальные напряжений после РДС (520 МПа и 450 МПа соответственно). Они значительно выше, чем после РДСМТ (330 и 340 МПа). Эта тенденция сохраняется и в металле шва и в ЗТВ, как в дефектных, так и в бездефектных сварных соединениях.

Деформация 2,0% не изменила типа дислокационной структуры в материале сварного шва –

по-прежнему дислокационная субструктура, как в феррите, так и в перлите, представляет плотные дислокационные сетки (после РДС и РДСМТ, как в дефектных, так и в бездефектных сварных соединениях). Тем не менее, границы фрагментов в феррите становятся все более четкими и резкими. Во всех исследованных образцах произошел рост как напряжений сдвига, так и локальных полей внутренних напряжений, причем максимальная амплитуда напряжений сдвига (350 МПа) определена в сварных бездефектных соединениях в ЗТВ (перлит) после РДС, а локальных моментных напряжений (360 МПа) после РДСМТ в дефектном металле шва (феррит).

Дальнейшее увеличение степени деформации до 3% привело к изменениям во фрагментированном феррите. Так, после РДС в бездефектных и дефектных сварных соединениях дислокационная структура внутри фрагментов превратилась в ячеистую (границы ячеек хорошо видны на рис.3). Границы фрагментов стали более четкие и резкие. На границах ферритных зерен присутствуют выделения частиц цементита ленточной формы. *Средний размер таких частиц* составляет 70 × 1000 нм. Их объемная доля в объеме материала ~1,5%. Частицы цементита присутствуют и по границам фрагментов.

При деформировании сварных соединений (как после РДС, так и РДСМТ) вначале происходит коробление и растаскивание перлитных колоний на отдельные части, вплоть до отдельных пластин. При этом пластины цементита разрезаются и измельчаются – происходит превращение идеального (неразрушенного) пластинчатого перлита в разрушенный, поэтому объемная доля неразрушенного перлита уменьшается, а разрушенного увеличивается. Постепенно цементит оказывается опутанным дислокациями. На месте бывших

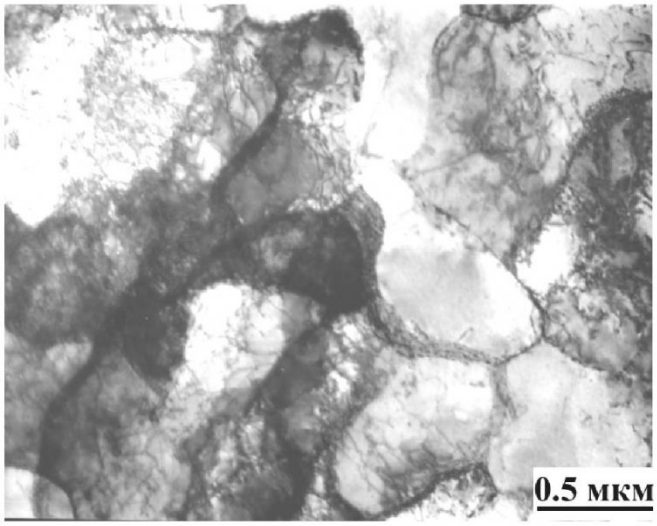

Рис.3. Фрагментированный феррит. РДС без искусственных дефектов. Электронно-микроскопическое изображение

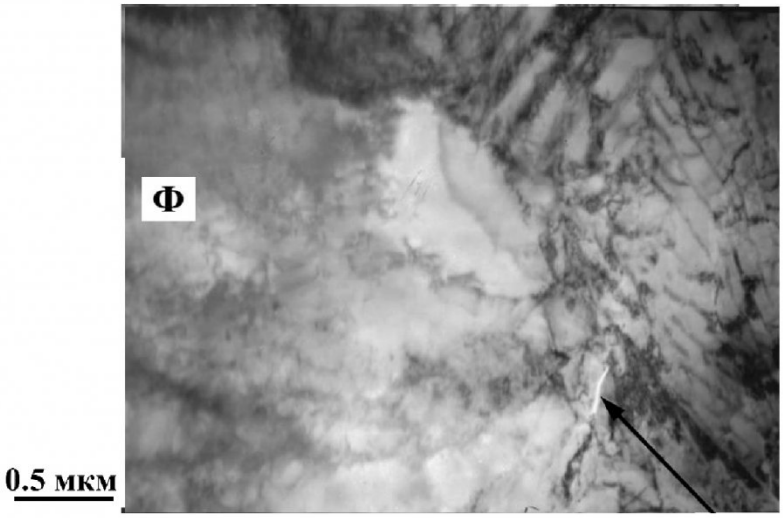

Рис.4. Феррито-перлитная смесь. Электронно-микроскопическое изображение. РДСМТ с искусственными дефектами. Стрелкой указана микротрещина.

межфазных границ феррит – цементит сохраняются лишь субграницы – образуется фрагментированный феррит. Дальнейшая деформация приводит к тому, что перлитных зерен в материале не остается. На месте бывших цементитных пластин формируется фрагментированная дислокационная субструктура. Границы фрагментов оказываются на тех места, где раньше были межфазные границы феррит – цементит, а на границах фрагментов присутствуют частицы цементита.

При деформации до 3%, когда пластинчатый перлит еще не разрушается, внутренние напряжения (как $\sigma_л$, так и $\sigma_д$) возрастают. Установлено, что основной вклад в величину $\sigma_д$ и её изменение вносит упругая составляющая, причем по мере увеличения степени пластической деформации этот вклад становится все более значителен, в то время как вклад пластической составляющей практически остается неизменным.

При деформации 3% после РДСМТ в дефектных образцах значения скалярной плотности дислокаций в разрушенном и неразрушенном перлите, а также в нефрагментированном феррите близки (соответственно $4{,}41\cdot10^{-10}$ см$^{-2}$, $4{,}11\cdot10^{-10}$ см$^{-2}$ и $3{,}82\cdot10^{-10}$ см$^{-2}$). Фрагментированный феррит имеет ρ значительно ниже ($2{,}35\cdot10^{-10}$ см$^{-2}$). Внутренние напряжения сдвига ($\sigma_л$) сформированные дислокационной структурой, оказались самыми высокими в разрушенном (420 МПа) и неразрушенном (410 МПа) перлите, несколько ниже в нефрагментированном феррите (390 МПа) и самые низкие во фрагментированном феррите (305 МПа), среднее 350 –МПа.

Величина внутренних локальных напряжений, равная сумме пластической и упругой составляющих, $\sigma_д$ = 695 МПа, из которой 305 МПа составляет пластическая составляющая и 390 МПа – упругая, что в местах фрагментированного феррита возможно возникновение микротрещин (рис.4).

После РДСМТ в образцах без дефектов объемная доля неразрушенного пластинчатого перлита составляет 15%, разрушенного – 5% от объема матрицы. Объемная доля нефрагментированного феррита – 15% и фрагментированного – 65%.

Скалярная плотность дислокаций (ρ) в морфологических составляющих перлита ниже, чем при РДСМТ без дефектов. Установлено, что изгиб кристаллической решетки во всех морфологических составляющих обусловлен только избыточной плотностью дислокаций, то есть внутренние локальные напряжения ($\sigma_д$) имеют преимущественно пластическую составляющую, в отличии от РДСМТ с дефектами, где присутствует и упругая составляющая, причем упругая составляющая была выше пластической.

Отличительной особенностью всех исследованных сварных соединений при 5% степени пластической деформации является то, что зерна разрушенного перлита обладают упругопластическим изгиб-кручением кристаллической решетки. При этой деформации продолжилось интенсивное разрушение перлитной составляющей. Её объемная доля при деформации 5% в объеме материала составляет лишь 5%, причем весь оставшийся перлит разрушен. Феррит– фрагментирован. Дислокационная структура в перлитных зернах и в нефрагментированном феррите –сетчатая, во фрагментированном – ячеистая. Внутри зерен всех морфологических составляющих материала присутствуют изгибные экстинкционные контуры.

Увеличение степени пластической деформации во всех образцах привело к увеличению избыточной плотности дислокаций. Однако, после РДСМТ в бездефектных сварных соединениях увеличение степени пластической деформации до 5% привело к тому, что во всех зернах перлита и в зернах фрагментированного феррита скалярная плотность дислокаций равна избыточной плотности дислокаций. Средняя по материалу амплитуда напряжений сдвига ($\sigma_л$) слабо изменяется при увеличении степени деформации.

Таким образом установлено, что во всех морфологических составляющих исследованных сварных соединений присутствует изгибные экстинкционные контуры, свидетельствующие о наличии в металле внутренних напряжений, причем число контуров возрастает по мере приближения к линии сплавления. Оценка полей внутренних напряжений показала, что в бездефектных сварных соединениях после РДС амплитуда полей внутренних напряжений в зоне линии сплавления выше (520 МПа и 450 МПа в перлите и феррите соответственно), чем после РДСМТ (330 и 340 МПа соответственно). Создание в сварных швах искусственных дефектов не привело к принципиальному изменению в структуре матрицы наплавленного и основного металла– структура представляет феррито-перлитную смесь. Однако после РДС в структуре бездефектных и дефектных сварных соединений существует ряд принципиальных отличий:

1. При деформации 3% перлитная составляющая представлена только дефектным неразрушенным перлитом, объемная доля которого в объеме наплавленного металла сварного шва в 2 раза меньше, чем при РДС без искусственных дефектов.
2. В структуре металла шва ферритная составляющая представлена в основном нефрагментированным ферритом с ячеистой дислокационной субструктурой, которая занимает в объеме материала большую долю (60%).
3. В ферритной составляющей наплавленного металла при деформации 3% и более величина скалярной плотности дислокаций несколько ниже ($\rho_ф$ = $3{,}09\cdot10^{10}$ см$^{-2}$) в дефектных образцах, чем в бездефектных ($\rho_ф$ = $3{,}63\cdot10^{10}$ см$^{-2}$), что связано с фрагментацией всего феррита в бездефектном материале.

Принципиальные отличия в структуре безде-

фектных и дефектных сварных соединений после РДСМТ заключается в следующем:

1. В дефектных сварных соединениях во фрагментированном феррите металла шва при деформации более 3% локальные моментные напряжения (σ_∂) равны сумме пластической и упругой составляющих, где упругая составляющая σ_∂ превышает пластическую, хотя и незначительно.

2. В бездефектных сварных соединениях во фрагментированном феррите локальные моментные напряжения сформированы в основном пластической составляющей.

Выводы

1. Наличие неметаллических включений в наплавленном металле дефектных сварных соединений после РДС и РДСМТ не привело к значительному изменению внутренних напряжений, по сравнению с бездефектным материалом в исходном состоянии и при деформации до 2%. В сварных соединениях образцов после РДС внутренние напряжения в зоне линии сплавления выше, чем после РДСМТ на 110 – 190 МПа. Эта тенденция сохраняется на всех стадиях деформации.

2. При степени деформирования до 5% в дефектных и бездефектных сварных соединениях после РДС произошло значительное увеличение напряжений сдвига в перлите (до 750 МПа), связанное с разрушением цементитных пластин. В отличие от РДСМТ, где при деформации 3% локальные моментные напряжения в образцах с дефектами достигают максимальной величины – 690 МПа во фрагментированном феррите. При таких напряжениях вероятность зарождения микротрещин более высока после РДС при деформациях более 3%.

3. Испытания сварных соединений углеродистых сталей, выполненных РДС и РДСМТ (даже при наличии дефектов, типа «неметаллических включений») необходимо проводить при нагрузках, приводящих к деформациям не превышающих 3%.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение № 14-19-00724.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Импульсивные технологии управления каплепереносом при MIG/MAG сварке / Н.П. Алешин, Э.А. Гладков, П.С. Кузнецов, В.Н. Бродягин, Е.Н. Копотева, М.А. Шолохов // Сварка и диагностика, 2014, № 3. С. 43-47.
2. Князьков В.Л. Повышение эффективности ручной дуговой сварки трубопроводов / В.Л. Князьков, А.Ф. Князьков - Кемерово: ГУ КузГТУ, 2008. - 104 с.
3. Испытания оборудования, работающего под давлением на опасных производственных объектах / А.Н. Смирнов, Е.А. Ожиганов, [и др.] // Технадзор. 2015, №10 (107). с. 72-75.
4. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
5. Лившиц Л.С., Хакимов А. Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
6. Конева Н.А., Козлов Э.В. Закономерности субструктурного упрочнения // Изв. вузов. Физика. – 1991. – №3. – С.56-70.
7. Конева Н.А., Козлов Э.В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов / Под ред. Д.Л. Мерсона // Перспективные материалы (учебное пособие). Тула: Изд-во ТГУ, МИСиС, 2006. – С.267-320.
8. Струнин Б.Н. О распределение внутренних напряжений при случайном расположении дислокаций // ФТТ. – 1967. – Т.9, №3. – С.805-812.
9. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
10. Козлов Э.В., Лычагин Д.В., Попова Н.А. и др. Дальнодействующие поля напряжений и их роль в деформации структурно-неоднородных материалов // Физика прочности гетерогенных материалов. – Л.: ФТИ, 1988. – С.3-13.

REFERENCES

1. Impul'sivnye tehnologii upravlenija kapleperenosom pri MIG/MAG svarke / N.P. Aleshin, JE.A. Gladkov, P.S. Kuznecov, V.N. Brodjagin, E.N. Kopoteva, M.A. SHolohov // Svarka i diagnostika, 2014, № 3. S. 43-47.
2. Knjaz'kov V.L. Povyshenie jeffektivnosti ruchnoj dugovoj svarki truboprovodov / V.L. Knjaz'kov, A.F. Knjaz'kov - Kemerovo: GU KuzGTU, 2008. - 104 s.
3. Ispytanija oborudovanija, rabotajushhego pod davleniem na opasnyh proizvodstvennyh ob#ektah / A.N. Smirnov, E.A. Ozhiganov, [i dr.] // Tehnadzor. 2015, №10 (107). s. 72-75.

4. Rybin V.V. Bol'shie plasticheskie deformacii i razrushenie metallov. – M.: Metallurgija, 1986. – 224 s.
5. Livshic L.S., Hakimov A. N. Metallovedenie svarki i termicheskaja obrabotka svarnyh soedinenij. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 336 s.
6. Koneva N.A., Kozlov JE.V. Zakonomernosti substrukturnogo uprochnenija // Izv. vuzov. Fizika. – 1991. – №3. – S.56-70.
7. Koneva N.A., Kozlov JE.V. Dislokacionnaja struktura i fizicheskie mehanizmy uprochnenija metallicheskih materialov / Pod red. D.L. Mersona // Perspektivnye materialy (uchebnoe posobie). Tula: Izd-vo TGU, MISiS, 2006. – S.267-320.
8. Strunin B.N. O raspredelenie vnutrennih naprjazhenij pri sluchajnom raspolozhenii dislokacij // FTT. – 1967. – T.9, №3. – S.805-812.
9. Panin V.E., Lihachev V.A., Grinjaev JU.V. Strukturnye urovni deformacii tverdyh tel. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – 229 s.
10. Kozlov JE.V., Lychagin D.V., Popova N.A. i dr. Dal'nodejstvujushhie polja naprjazhenij i ih rol' v deformacii strukturno-neodnorodnyh materialov // Fizika prochnosti geterogennyh materialov. – L.: FTI, 1988. – S.3-13.

Поступило в редакцию 16.06.2016
Received 16 Juny 2016