



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-160-171>
УДК 621.785.4: 791

Поступила 30.01.2026
Received 30.01.2026

ОЦЕНКА ХРУПКОВЯЗКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ Р91 ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ

А.Л. МИНЬКОВ, М.Н. ФИЛИППОВ, Д.А. СКУРАТОВА,

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.

E-mail: minkov@bntu.by, filipov@bntu.by, mathematics@bntu.by. Тел.: + 375 29 531-32-28

Проведен мониторинг хрупковязкого состояния сварного соединения жаропрочной стали Р91 методом идентификации по Бринеллю. Определены и формализованы зависимости между твердостью и показателями пластичности и прочности, а также между твердостью и энергетическими параметрами разрушения при испытании на ударный изгиб. Рассчитан диапазон значений твердости, в рамках которых металл шва переходит из хрупковязкого в хрупкое состояние. Рассчитана удельная работа пластической деформации стали Р91.

Ключевые слова. Сталь Р91, сварные соединения, твердость по Бринеллю, неразрушающий контроль, хрупкое разрушение, вязкое разрушение, энергия разрушения, коэффициент ударной пластичности.

Для цитирования. Миньков, А.Л. Оценка хрупковязкого состояния сварного соединения из стали Р91 идентификацией твердости по Бринеллю / А.Л. Миньков, М.Н. Филиппов, Д.А. Скуратова // Литье и металлургия. 2026. № 1. С. 160–171. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-160-171>.

EVALUATION OF THE BRITTLE-DUCTILE STATE OF A WELDED JOINT OF STEEL GRADE P91 BY IDENTIFICATION THE BRINELL HARDNESS

A. L. MINKOV, M. N. FILIPPOV, D. A. SKURATOVA, Belarusian National Technical University, Minsk,

Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: minkov@bntu.by, filipov@bntu.by, mathematics@bntu.by.

Tel.: + 375 29 531-32-28

The ductile-brittle state of a welded joint of P91 heat-resistant steel was monitored using the Brinell identification method. The relationships between hardness and ductility and strength parameters, as well as between hardness and fracture energy parameters during impact bending testing, were determined and formalized. The range of hardness values within which the weld metal transitions from a ductile-brittle to a brittle state was calculated. The specific work of plastic deformation of P91 steel was calculated.

Keywords. P91 steel, welded joints, Brinell hardness, non-destructive testing, brittle fracture, ductile fracture, fracture energy, impact ductility coefficient

For citation. Minkov A. L., Filippov M. N., Skuratova D. A. Evaluation of the brittle-ductile state of a welded joint of steel grade P91 by identification the brinell hardness. Foundry production and metallurgy, 2026, no. 1, pp. 160–171. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-1-160-171>.

Жаропрочная сталь Р91 была разработана в США в середине 70-х годов XX в., используется при производстве паропроводов и элементов котлов для атомных и тепловых электростанций. Отличительная особенность стали Р91 – наличие большого содержания хрома (9%), а также молибдена (до 1%) и небольших добавок ванадия, ниобия и азота [1]. Химический состав стали Р91 приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав стали марки Р91 [1]

Элемент	C	Cr	Mo	Si	Mn	V	Nb	N	Fe
Мас. %	0,10	9,00	0,92	0,23	0,46	0,18	0,08	0,084	Основа

В энергетике эксплуатация трубопроводов происходит в условиях высоких температур до 650 °С и давлений до 24 МПа. При таких условиях на надежную и безотказную работу трубопроводов основное влияние оказывает качество сварного соединения. В свою очередь, оно зависит от наличия дефектов и остаточных напряжений. Известно [2], что при эксплуатации паропроводов разрушение с вероятностью 95% происходит путем образования трещин III или IV типа в зоне термического влияния (ЗТВ)

сварного соединения. Поэтому мониторинг хрупковязкого состояния ЗТВ имеет определяющее значение, так как ЗТВ является критической областью, где механические свойства металла значительно изменяются из-за теплового воздействия сварочной дуги. Мониторинг хрупковязкого состояния наиболее удобно и быстро провести методом неразрушающего контроля – идентифицированием твердости по Бринеллю [3, 4]. Этот метод позволяет оценить остаточный ресурс и работоспособность, а также пригодность для дальнейшей эксплуатации паропровода. Определение твердости проводится в зонах максимальных силовых и тепловых нагрузок контролируемой конструкции. Алгоритм оценки характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости металла контролируемых зон сварного соединения проводится только по результатам измерения твердости по Бринеллю. Твердость сталей при их деформировании от состояния поставки вплоть до разрушения возрастает, а значения пластичности и ударной вязкости уменьшаются. При этом максимальная твердость имеет место на поверхности разрушения. Поэтому для каждой конкретной плавки стали существует шкала твердости с максимальным значением ее в состоянии поставки и максимальным на поверхности разрушения [5–7].

На рис. 1 представлен алгоритм оценки состояния конструкции измерением твердости по Бринеллю, включающий четыре этапа [4, 8].

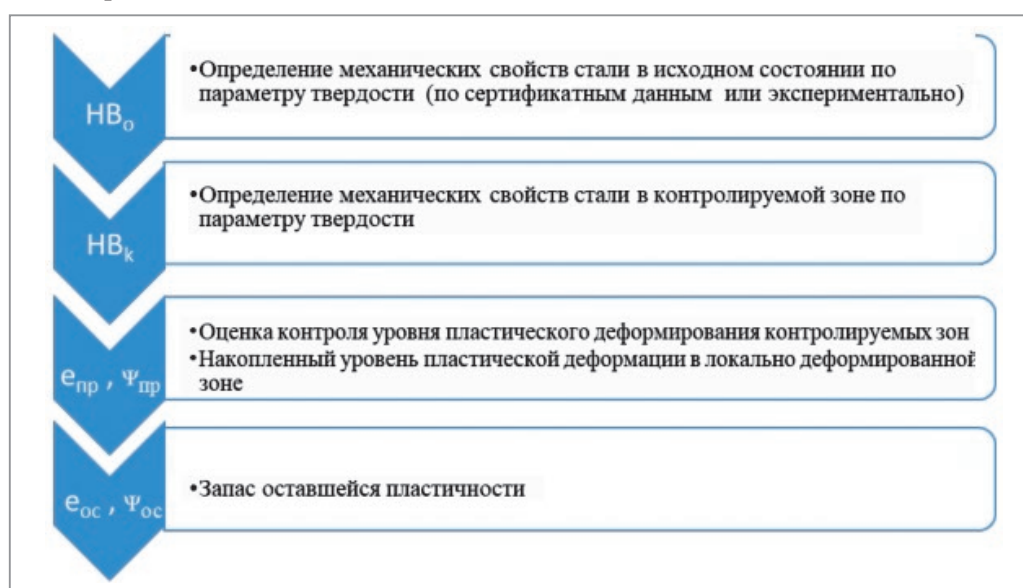


Рис. 1. Алгоритм оценки состояния конструкции [4, 8]

Вначале проводится определение механических свойств стали в исходном состоянии по параметру твердости. Далее определяются механические свойства стали в контролируемой зоне по твердости. На следующем этапе проводится оценка уровня накопленной пластической деформации и затем определяется запас пластичности.

Исследования на одноосное растяжение показали, что при достижении значений остаточной пластической деформации порядка 19–20 % и относительного сужения около 40 % равномерное удлинение образца заканчивается и начинается процесс образования шейки [9]. В реальных же конструкциях такое значение остаточной деформации соответствует возникновению внутренних пор и микротрещин [10]. При использовании вышеизложенной методики оценки состояния сварной конструкции измерением твердости по Бринеллю наиболее целесообразно применять портативные твердомеры, например, твердомер ультразвуковой ТКМ 459С [11,12].

Методика и оборудование для исследований

Многопроходную сварку образцов труб диаметром 559 мм и толщиной 14,27 мм проводили в горизонтальном положении методом TIG в среде аргона с тепловложением до 4,4 кДж/см. Температура предварительного подогрева – 300 °С. Сварку осуществляли в девять проходов при силе сварочного тока 90–110 А и напряжении дуги 12–14 В. Постсварочная термическая обработка: нормализация от 1050 °С и высокий отпуск 700 °С. На рис. 2 показан внешний вид сварного образца.

Измерение твердости по Бринеллю металла различных участков сварного соединения из стали Р91 по поверхности сечения осуществляли прибором ТЭМП-4 согласно ГОСТ 6996-66 [13].



Рис. 2. Внешний вид сварного образца

Испытание на ударный изгиб (КСУ) образцов, вырезанных из трубной заготовки, проводили на маятниковом копре PSWO 30 по ГОСТ 6996-66 [13]. Исходные данные при испытании: скорость движения маятника V_0 – 5,6 м/с; начальная энергия маятника E_0 – 15 кгс·м; расстояние между опорами копра – 40 мм.

Испытания на одноосное статическое растяжение проводили на образцах цилиндрических, тип II по ГОСТ 6996-66 [13] на машине разрывной ZD 10/90.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 3 показаны значения твердости по Бринеллю, идентифицированные по сечению сварного образца. Расстояние между точками измерения по горизонту – 4–5 мм, а расстояние между слоями по высоте – 4–5 мм.



Рис. 3. Значения твердости по Бринеллю, идентифицированные по сечению сварного образца:

1 – основной металл; 2 – зона термического влияния (ЗТВ); 3 – шов

Из рисунка видно, что на макроструктуре образца заметна отдельная протяженная зона вдоль корня шва. Также отчетливо заметны три зоны: основной металл (зона 1), зона термического влияния (зона 2) и шов (зона 3).

В табл. 2 приведены значения твердости по сечению сварного соединения. Очевиден значительный скачок твердости в районе корня шва. ЗТВ шва имеет форму, не параллельную границам шва, а уширяющуюся к корню. Область шва – зона 3, основной металл – зона 1.

Таблица 2. Распределение значений твердости (НВ) по сечению сварного соединения

Номер слоя	Основной металл			ЗТВ	Шов				ЗТВ	Основной металл		
Верхний слой					226	218	221	231	220			
3-й слой	162	164	172	208	224	239	230	235	214	174	171	173
2-й слой	177	176	179	234	250	227	234	236	228	172	171	168
1-й слой (корневой)	198	328	341	362	336	372	362	375	323	334	300	214

Выявленный скачок значений твердости в ЗТВ данного сварного соединения в дальнейшем может привести к возможно более быстрому выходу из строя паропровода по причине образования трещин.

Значения твердости по Бринеллю основного металла (сталь Р91 в состоянии поставки) приняли как среднее из средних семи измерений твердости: $HV_{cp} = 171,6 HV \cdot 10 = 1716 \text{ МПа}$.

На рис.4 показана диаграмма разрушения образца из стали Р91 в состоянии поставки на ударный изгиб, а в табл. 3 приведены результаты испытания.

Таблица 3. Результаты испытания на ударный изгиб

Высота рабочего сечения, мм	Ширина образца, мм	Площадь, см^2	U , Дж	KCU , Дж/ см^2	Величина прогиба L , мм
5,0	10,0	0,50	59,84	119,68	8,0

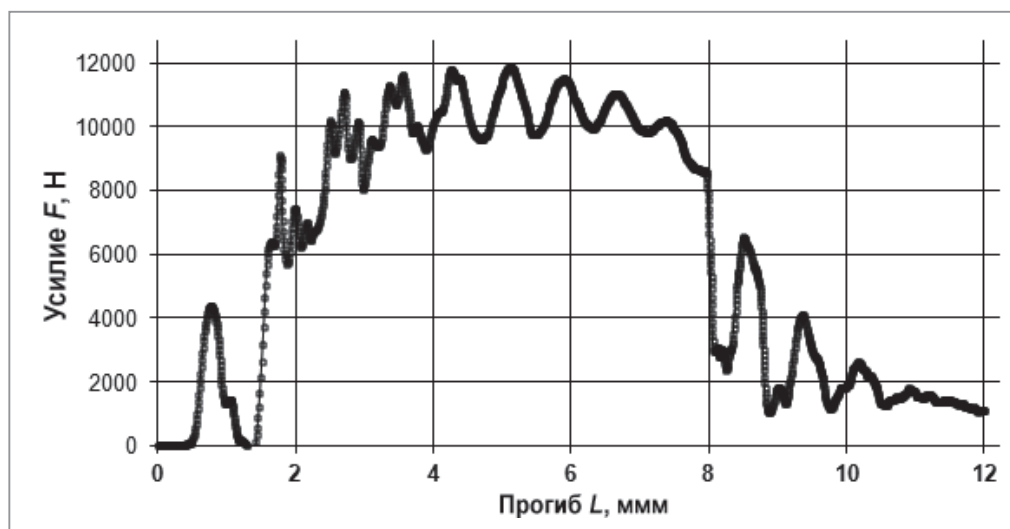


Рис. 4. Диаграмма разрушения образца при испытании на ударный изгиб

На рис. 5, а показана диаграмма разрушения при испытании на одноосное статическое растяжение (зависимость относительного удлинения от усилия растяжения) стали Р91 в состоянии поставки, а на рис. 5, б – пересчитанная в реальных координатах зависимости удлинения образца Δl , мм, от усилия растяжения F , Н.

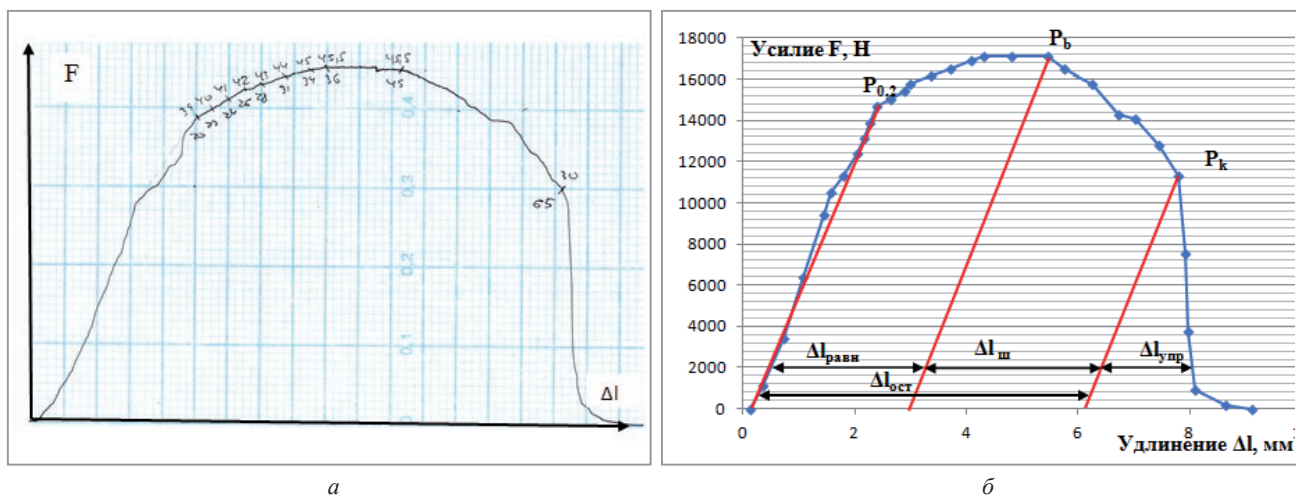


Рис. 5. Диаграмма испытания на статическое растяжение

Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытания на одноосное статическое растяжение

Начальный диаметр d_0 , мм	Площадь сечения F_0 , мм^2	Начальная длина L_0 , мм	Диаметр после разрыва d_k , мм	Конечная длина L_k , мм	Нагрузка предела текучести $P_{0,2}$, Н	Максимальная нагрузка P_b , Н	Нагрузка разрушения P_k , Н	Предел текучести σ_t , МПа	Время сопротивления σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
6,0	28,3	30,0	2,6	36,1	14779	17100	11275	523	605	20,3	81,2

На рис. 6 показана диаграмма зависимости деформаций от напряжений для стали P91 в состоянии поставки, построенная по данным рис. 5 и табл. 4.

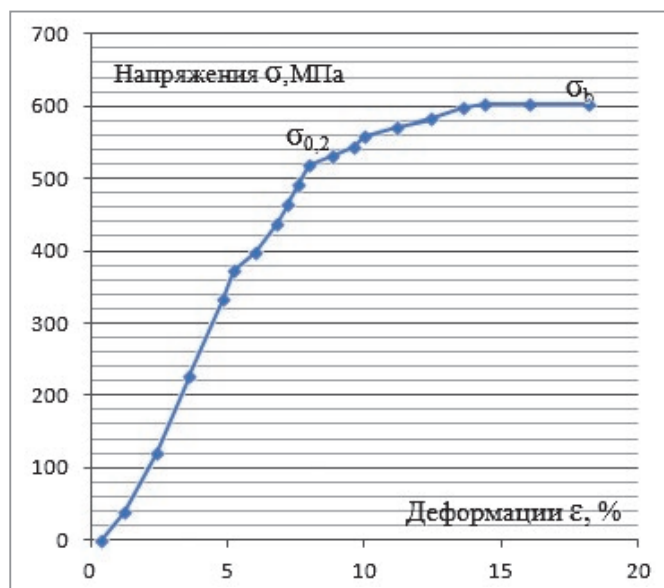


Рис. 6. Диаграмма зависимости деформаций от напряжений стали P91

Исходя из данных, полученных при испытании при одноосном растяжении (рис. 5, 6), очевидно, что сталь P91 в состоянии поставки находится в упроченном состоянии, так как отсутствует площадка текучести. Также видно, что равномерное удлинение продолжалось на 3 мм до диаметра 5,8 мм до максимальной нагрузки $P_b = 17100$ Н, далее образовалась шейка, которая удлинялась до 3,1 мм до нагрузки разрушения $P_k = 11275$ Н. Отметим, что временное сопротивление, равное 605 МПа, соответствует деформации 18,2%.

Максимальное значение твердости, которое возможно получить для стали P91, определяли согласно [7]:

$$HB_{\max} = HB_0 \cdot e^{\psi} = 1716 \cdot 2,73^{0,812} = 3865. \quad (1)$$

Твердость стали P91 в состоянии поставки равна 1716 МПа, тогда соответствующие ей глубина отпечатка h [7] и диаметр отпечатка d [7] равны:

$$h_{1716} = \frac{D}{\pi \cdot D \cdot HB} = 0,557, \quad (2)$$

$$d_{1716} = 2\sqrt{h(D-h)} = 4,59 \text{ мм}. \quad (3)$$

Находим значения глубины отпечатка h и диаметра отпечатка d , соответствующие максимальному значению твердости 375 HB, которое было определено в сечении сварного соединения:

$$h_{3750} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot HB} = 0,25 \text{ мм}, \quad (4)$$

$$d_{3750} = 2\sqrt{h(D-h)} = 3,12 \text{ мм}. \quad (5)$$

Рассчитываем значение твердости, соответствующее началу образования шейки, т.е. окончанию равномерной деформации растяжения, равной 19–20%. Диаметр контрольного отпечатка для указанного состояния определяется из [7] и по значению d_x . Далее определяем значение твердости, соответствующей твердости при образовании шейки $HB_{ш}$, которая образуется при испытании на одноосное растяжение:

$$\ln\left(\frac{d_0}{d_x}\right) = e^{0,2} = 1,22, \quad (6)$$

$$d_x = 3,76 \text{ мм}.$$

Диаметр отпечатка, равный 3,76 мм, соответствует твердости 260 HB. Любое значение твердости более 2600 МПа соответствует началу образования в деформированном металле внутренних пустот, пор и микротрещин. Указанные дефекты потом под действием рабочей нагрузки сливаются, образуя макротрещину, приводящую к разрушению.

Определяем запас пластичности и деформацию при твердости, соответствующей 260 и 375 HB [7]:

$$\Delta\Psi_{\text{пл}}(260 \text{ HB}) = \Psi_{1716} - \ln\left(\frac{0,557}{0,368}\right) = 0,812 - 0,414 = 0,398, \quad (7)$$

$$\varepsilon(260 \text{ HB}) = \ln\left(\frac{d_0}{d_{260}}\right) = 0,198 = 20\%, \quad (8)$$

$$\Delta\Psi_{\text{пл}}(375 \text{ HB}) = \Psi_{1716} - \ln\left(\frac{0,557}{0,25}\right) = 0,812 - 0,801 = 0,011, \quad (9)$$

$$\varepsilon(375 \text{ HB}) = \ln\left(\frac{d_0}{d_{375}}\right) = 0,386 = 39\%, \quad (10)$$

где Ψ – коэффициент пластичности; $\Delta\Psi_{\text{пл}}$ – запас пластичности; ε – деформация.

Расчеты показали, что при достижении твердости, равной 260 HB, деформация стали соответствует 20%, а запас пластичности падает в 2 раза. При достижении твердости, равной 375 HB, деформация соответствует 39% при почти полном отсутствии запаса пластичности.

На рис. 6 показаны зависимости остаточной деформации от твердости (1), влияния твердости на остаточную пластичность (2) и зависимость деформации в лунке (h/d) от твердости (3). Расчеты проведены по формулам (1) – (10).

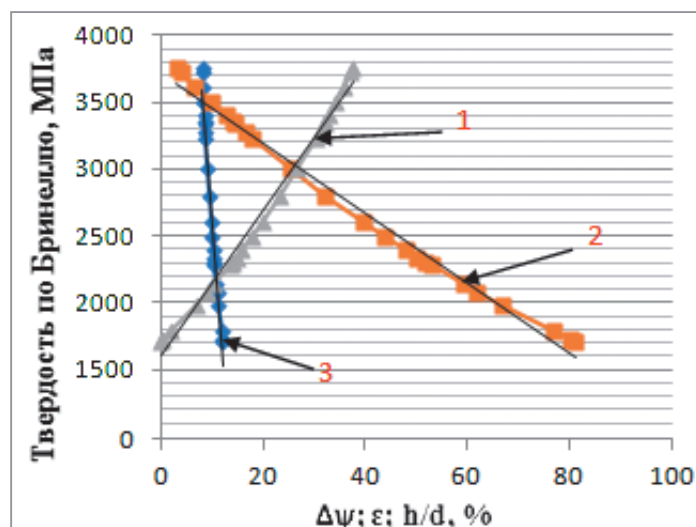


Рис. 6. Влияние твердости сварного соединения на остаточную деформацию ε (1); на запас пластичности $\Delta\Psi$ (2); на деформацию в лунке (h/d) (3)

Из рисунка видно, что зависимость остаточной деформации от твердости носит линейный характер и начинается с нуля при твердости 1600 МПа, доходя до 39% при твердости 3750 МПа. Данная зависимость аппроксимируется следующим выражением:

$$\text{HB} = 54,61\varepsilon + 1600 \text{ с коэффициентом детерминации } R^2=0,99. \quad (11)$$

Связь запаса пластичности и твердости (рис. 6, 2) носит линейный характер и начинается с 81,2% при твердости 1716 МПа, доходя до 1,1% при твердости 3750 МПа. Эта зависимость аппроксимируется следующим выражением:

$$\text{HB} = -26,22\Delta\Psi_{\text{пл}} + 3723,5 \text{ с коэффициентом детерминации } R^2=0,98. \quad (12)$$

Зависимость деформации в лунке (h/d) от твердости носит линейный характер и показывает спад от 12% при твердости 1716 МПа до 8% при твердости 3750 МПа и аппроксимируется следующим выражением:

$$\text{HB} = -506,17\left(\frac{h}{d}\right) + 7674,4 \text{ с коэффициентом детерминации } R^2=0,97. \quad (13)$$

Стандартные испытания на ударный изгиб являются основным и наиболее распространенным способом проверки способности материала сопротивляться ударным нагрузкам. Многочисленные исследования показывают, что ударная вязкость зависит не только от формы образцов и надреза, но также от

скорости и температуры испытаний [6]. Ударная вязкость представляет собой значение работы разрушения образца, уменьшенное в масштабе на величину площади его сечения в надрезе. Для придания физического смысла понятию «ударная вязкость» и для того, чтобы расширить возможность использования результатов испытаний на ударную вязкость, предложен [14] другой подход для оценки состояния сталей, основанный на величине энергии деформации и определении удельной работы пластического деформирования. Удельная работа пластического деформирования имеет конкретный физический смысл и позволяет по значению накопленной энергии оценивать состояние контролируемых конструкций в реальных температурно-силовых условиях эксплуатации.

В процессе статического и динамического деформирования материала происходит поглощение энергии деформации, представляющей собой суммарную величину упругих $U_{упр}$ и пластических деформаций $U_{пл}$, общий баланс энергии можно записать в виде [14]:

$$U_{полн} = U_{упр} + U_{пл} = \frac{(\sigma^2 V_0)}{2E} + a_v V_{пл}, \quad (14)$$

где σ – временное сопротивление; E – модуль Юнга; V_0 – объем образца между опорами копра за вычетом объема надреза; a_v – удельная работа пластической деформации металла; $V_{пл}$ – величина пластически деформированного объема ударного образца.

Из формулы (14) очевидно, что значение поглощенной энергии удара зависит от удельной работы пластического деформирования материала a_v и величины пластически деформированного объема ударного образца $V_{пл}$. Согласно положению Мозера-Одинга о том, что значение работы (а значит и поглощенной энергии), воспринимаемой единицей объема материала, является для него величиной постоянной и независимой ни от формы испытуемого образца или формы надреза, ни от скорости нагружения, ни от температуры испытаний, а зависит лишь от физической природы материала [14]. Удельная работа пластического деформирования материала a_v представляет собой количество поглощенной энергии, приходящейся на единицу объема, и имеет тот же энергетический смысл, что и ударная вязкость, но не зависит от многочисленных факторов, согласно вышеотмеченному положению, и является механической константой материала, постоянной для каждой конкретной плавки стали [14]. Удельная работа пластического деформирования может быть определена на основании уравнения (14) по значению энергии пластической деформации и вычислению величины пластически деформированного объема ударного образца $V_{пл}$. Значение $V_{пл}$ определяется экспериментально при испытании на ударный изгиб и последующим совмещением половинок разрушенного образца (рис. 7) графическим путем, замеряя угол пластического поворота и величину прогиба L .

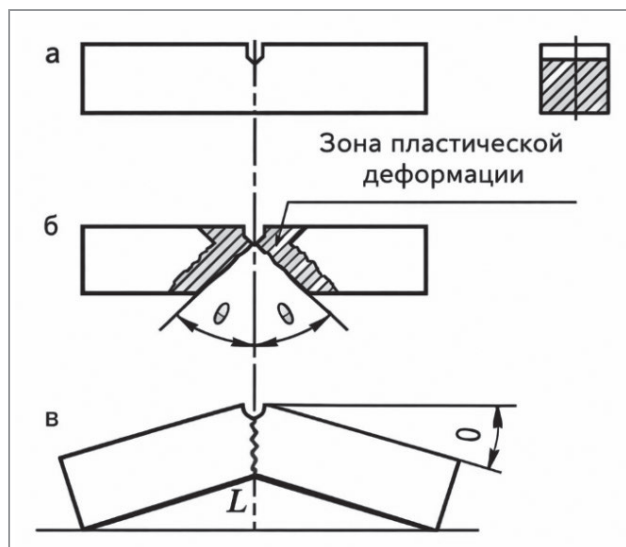


Рис. 7. Ударный образец до испытаний (а) и после испытаний (б) и совмещения половинок образца для определения угла пластического поворота Θ и величины прогиба L (в) [12]

Значение пластически деформированного объема ударного образца $V_{пл}$ определяется по формуле [12]:

$$V_{пл} = K_{\phi} B h^2 \operatorname{tg} \Theta, \quad (15)$$

где $K_{\phi} = 4,0-4,2$; B, h – ширина и высота образца в сечении по надрезу; Θ – угол пластического поворота.

Из рисунка видно, что величина прогиба образца L связана с углом пластического поворота Θ соотношением:

$$L = 20 \sin \Theta. \quad (16)$$

Ранее было определено, что при испытании на ударный изгиб величина полной энергии, затраченной на разрушение образца из стали P91 в состоянии поставки, равна $U_{\text{полн}} = 59,84$ Дж, величина прогиба образца $L = 8$ мм, то угол пластического поворота $\Theta = 23^\circ$, тогда $\text{tg} \Theta = 0,424$.

Определяем объем металла образца при испытании на ударный изгиб, находящийся между опорами копра:

$$V_0 = l \cdot B \cdot h = 40 \cdot 10 \cdot 6 = 2400 \text{ мм}^3, \quad (17)$$

где B – ширина; h – высота образца; l – расстояние между опорами копра 40 мм.

По формуле (15) определяем $V_{\text{пл}} = 424 \text{ мм}^3$.

В формуле (14) определяем первое слагаемое:

$$U_{\text{упр}} = (\sigma^2 V_0) / 2E = 897,45 \text{ Н} \cdot \text{мм},$$

где E – модуль Юнга (продольной упругости) для стали P91 составляет $2,2 \cdot 10^{11}$ Па [15].

Далее по формуле (14) рассчитываем $U_{\text{пл}}$:

$$U_{\text{пл}} = U_{\text{полн}} - U_{\text{упр}} = 59841 \text{ Н} \cdot \text{мм} - 897,45 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 58943,55 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 58,9 \text{ Дж}.$$

Тогда удельная работа пластической деформации a_v равна:

$$a_v = U_{\text{пл}} / V_{\text{пл}} = 139,02 \text{ Н/мм}^2.$$

Экспериментально установлено [6], что количество поглощенной энергии зависит от тангенса угла пластического поворота:

$$U_{\text{полн}} = k_u \text{tg} \Theta, \quad (18)$$

где k_u – коэффициент пропорциональности между $U_{\text{полн}}$ и $\text{tg} \Theta$. Также $\text{tg} \Theta$ связан с коэффициентом пластичности:

$$\psi = k_\psi \text{tg} \Theta, \quad (19)$$

где k_ψ – коэффициент пропорциональности между ψ и $\text{tg} \Theta$.

Как видно из формул (18) и (19), это линейные зависимости, поэтому, зная ψ ; $\text{tg} \Theta$; $U_{\text{полн}}$ в состоянии поставки при известной твердости, можно рассчитать ψ ; $\text{tg} \Theta$; $U_{\text{полн}}$ при всех других значениях твердости.

На рис. 8 показана зависимость поглощенной энергии $U_{\text{полн}}$ от тангенса угла пластического поворота:

$$U_{\text{полн}} = 141,13 \cdot \text{tg} \Theta. \quad (20)$$

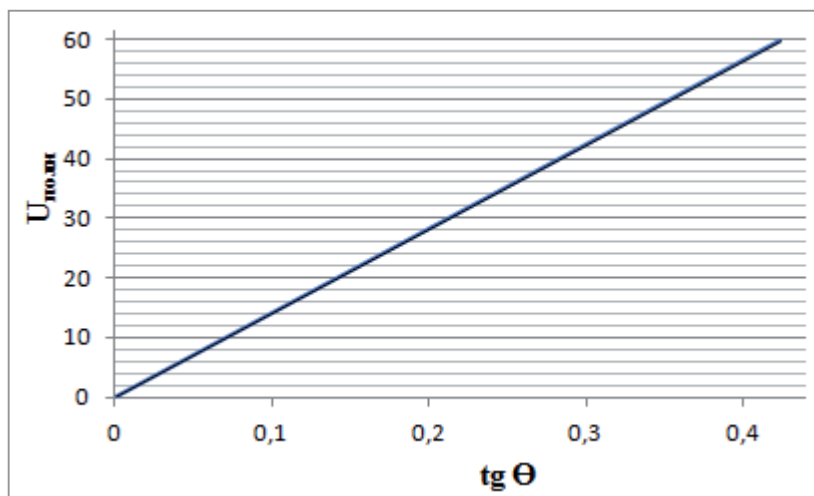


Рис. 8. Зависимость поглощенной энергии $U_{\text{полн}}$ от тангенса угла пластического поворота $\text{tg} \Theta$

На рис. 9 показана зависимость показателя пластичности ψ от тангенса угла пластического поворота:

$$\psi = 1,9151 \cdot \text{tg} \Theta - 2 \cdot 10^{-16}. \quad (21)$$

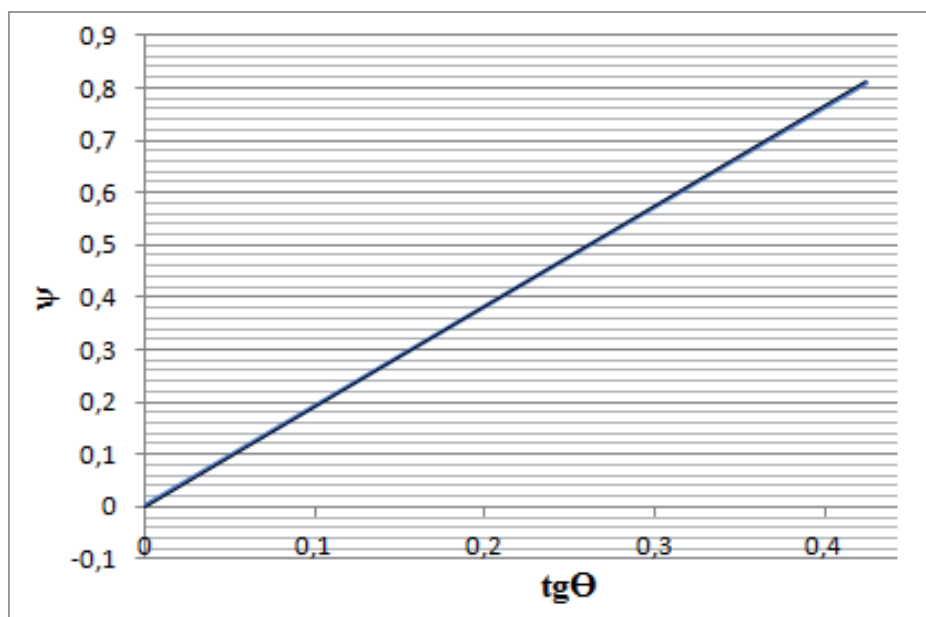


Рис. 9. Зависимость показателя пластичности Ψ от тангенса угла пластического поворота $\text{tg}\Theta$

На рис. 10 показана связь между твердостью сварного соединения HB и полной энергией разрушения $U_{\text{пол}}$, которая выражается следующей формулой:

$$U_{\text{пол}} = -0,0281 \cdot \text{HB} + 104,58 \quad \text{с коэффициентом детерминации } R^2 = 0,98. \quad (22)$$

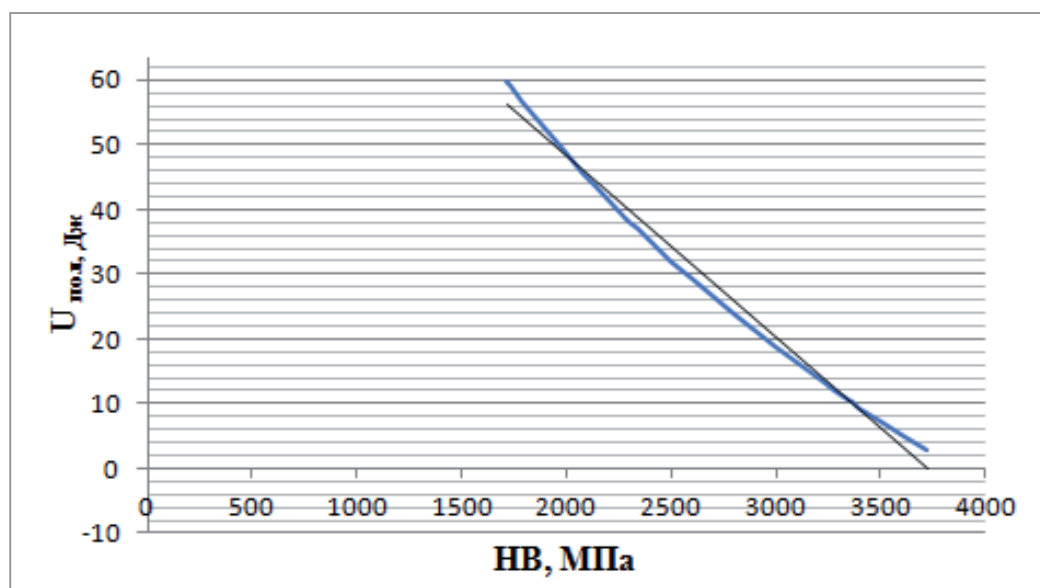


Рис. 10. Взаимосвязь твердости сварного соединения HB и полной энергии $U_{\text{пол}}$ разрушения

При анализе состояния сварного соединения, прежде всего с целью обнаружения локально-деформированных зон с высокой концентрацией деформаций и напряжений, наиболее просто оценивать состояние сварного соединения измерением твердости. Чтобы от измеренного значения твердости перейти к оценке состояния локально-деформированной зоны, требуется знать взаимосвязь твердости и ударной вязкости контролируемого участка металла сварного соединения. Таким критерием оценки состояния является характеристика ударной пластичности β . Ударная пластичность β определяется по формуле [6]:

$$\beta = \frac{U_{\text{полн}}}{F \cdot \text{HB}}, \quad (23)$$

где $U_{\text{пол}}$ – поглощенная энергия ударным образцом; F – площадь сечения образца по надрезу; HB – твердость по Бринеллю.

Значение β представляет собой отношение энергии к силе в соответствии с теоремой Лагранжа, отношение энергии к силе является перемещением [8, 9]. Данная зависимость справедлива для упругой и пластической стадии деформирования вплоть до разрушения. Соответственно характеристика β служит критерием оценки пластичности локальнодеформированных зон сварного соединения.

На рис. 11 показана зависимость ударной пластичности β сварного соединения от полной энергии разрушения $U_{\text{пол}}$, которая выражается следующей формулой:

$$U_{\text{пол}} = 84,838 \beta + 6,259 \text{ с коэффициентом детерминации } R^2 = 0,96. \quad (24)$$

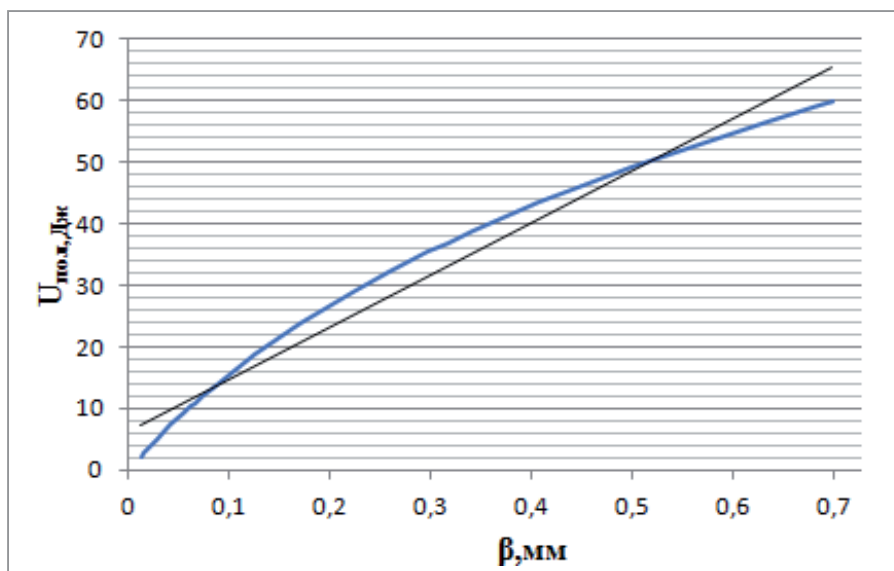


Рис. 11. Зависимость ударной пластичности β сварного соединения от полной энергии разрушения $U_{\text{пол}}$

На рис. 12 показана зависимость ударной пластичности β сварного соединения от твердости НВ, которая выражается следующей формулой:

$$\text{НВ} = -2888,5 \beta + 3453,4 \text{ с коэффициентом детерминации } R^2 = 0,92. \quad (25)$$

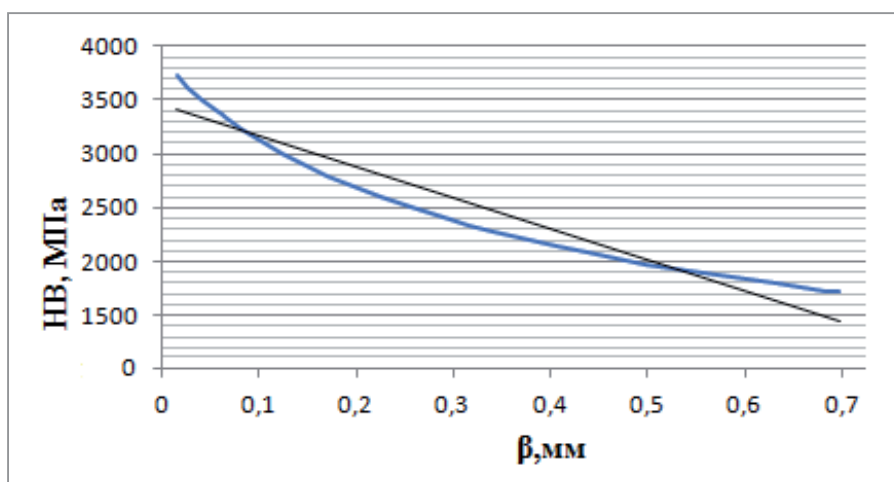


Рис. 12. Зависимость ударной пластичности β сварного соединения от твердости НВ

Очевидно, что коэффициент ударной пластичности β прямо пропорционален величине прогиба L и тангенсу угла пластического поворота $\text{tg}\Theta$, соответственно чем больше прогиб образца, тем больше энергии тратится на разрушение. Например, если у двух сравниваемых сталей временное сопротивление одинаковое, то более качественной считается та, у которой значение β больше [9].

На рис. 13 показана зависимость ударной пластичности β сварного соединения от тангенса угла пластического поворота $\text{tg}\Theta$, которая выражается следующей формулой:

$$\text{tg}\Theta = 0,5922 \beta + 0,0483 \text{ с коэффициентом детерминации } R^2 = 0,96. \quad (26)$$

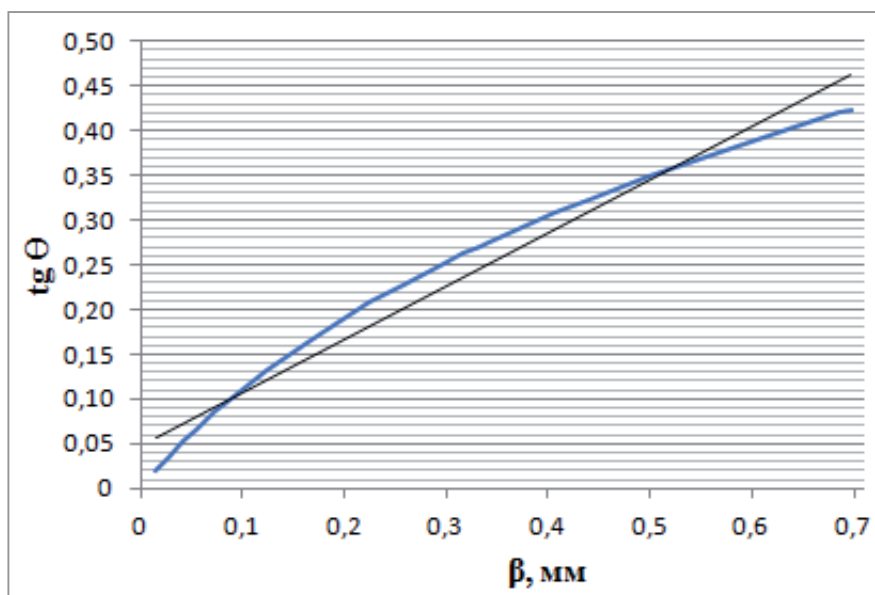


Рис. 13. Зависимость ударной пластичности β сварного соединения от тангенса угла пластического поворота $\text{tg}\Theta$

Выводы

Рассчитана удельная работа пластической деформации стали P91, которая равна 139,02 Н/мм².

Определено, что твердость, равная 260 НВ, соответствует началу образования в деформированном металле внутренних пустот, пор и микротрещин при остаточной деформации 18,2% с временным сопротивлением 605 МПа.

Формализованы следующие корреляции между:

- остаточной деформацией и твердостью;
- твердостью и остаточной пластичностью;
- поглощенной энергией и тангенсом угла пластического поворота;
- показателем пластичности и тангенсом угла пластического поворота;
- твердостью сварного соединения и полной энергии разрушения;
- ударной пластичностью и полной энергией разрушения;
- ударной пластичностью и твердостью;
- ударной пластичностью и тангенсом угла пластического поворота.

Определено, что значения твердости сварного соединения более 300 НВ соответствуют переходу в хрупкое состояние, так как коэффициент ударной пластичности принимает значение 0,1 мм и менее.

Установлено, что увеличение твердости от 260 НВ (коэффициент $\beta=0,2$ мм) до 300 НВ (коэффициент $\beta=0,1$ мм) приводит к переходу из хрупковязкого состояния в полностью хрупкое.

Работа выполнена под научным руководством члена-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. Ф.И. Пантелеенко в рамках исполнения НИР № 4 задания 3.3.6 «Разработка научно-практических основ безобразцовой оценки состояния и трещиностойкости материала сварных соединений» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы, утвержденной постановлением СМ РБ от 27.07.2020 № 438.

ЛИТЕРАТУРА

1. Evolution of Minor Phases in a P91 Steel Normalized and Tempered at Different Temperatures / C.Hurtado-Noreña [et al.] // International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials, SAM-CONAMET. – 2013. – P. 143–146.
2. Хромченко, Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф.А. Хромченко. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
3. Данилов, В.И. Применение безобразцового метода контроля механических свойств сталей в условиях металлургического производства / В.И. Данилов, М.С. Дрозд, Ю.И. Славский // Заводская лаборатория. – 1972. – № 2. – С. 217–221.
4. Сидоров, В.А. Оперативная диагностика механических свойств изделий / В.А. Сидоров, Ф.И. Пантелеенко // Современные технологии для заготовительного производства: сб. науч. работ Респ. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 18–20.
5. Пояркова, Е.В. Прочность сварных конструкций: учеб. пособие / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова, Ж.Г. Калеева. – Орск: Изд-во Орского гуманитар.-технолог. ин-та (филиала) ОГУ, 2012. – 222 с.
6. Жданович, Г.М. О взаимосвязи пластичности и ударной вязкости малоуглеродистых и низколегированных сталей / Г.М. Жданович, А.А. Хмелев // Металлургия: респ. межвед. сб. науч. трудов. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – Вып. 22. – С. 22–24.

7. Сидоров, В. А. О диаграмме хрупковязкого состояния малоуглеродистых сталей, определенной по результатам измерения твердости / В. А. Сидоров, А. А. Хмелев // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов. – Минск: Технопринт, 2001. – Вып. 17. – С. 387–391.
8. Сидоров, В. А. Алгоритм оценки состояния конструкции измерением твердости по Бринеллю / В. А. Сидоров, Ф. И. Пантелеенко // Современные технологии для заготовительного производства: сб. науч. работ Респ. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 94–95.
9. Хмелев, А. А. О единой закономерности разрушения образцов различной формы и размеров при ударном изгибе / А. А. Хмелев, В. А. Сидоров // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2005. – Вып. 21, Т. 2. – С. 32–35.
10. Хмелев, А. А. Сопrotивление материалов / А. А. Хмелев, В. А. Сидоров // Лабораторные работы. – Минск: Технопринт, 2004. – 206 с.
11. Хмелев, А. А. Механика разрушения / А. А. Хмелев, В. А. Сидоров. – Минск: БНТУ, 2007. – 236 с.
12. Механика разрушения и механические свойства материалов: пособие для студентов специальности 1–36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» / Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – 207 с.
13. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – М.: Изд-во стандартов, 1966. – 28 с.
14. Пантелеенко, Ф. И. Удельная работа пластического деформирования стали как критерий оценки ее качества / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Сидоров, А. А. Хмелев // Перспективные материалы и технологии: материалы Международного симпозиума. Минск, 2021. – С. 49–50.
15. Guidelines and Specifications for High-Reliability Fossil Power Plants: Best Practice Guideline for Manufacturing and Construction of Grade 91 Steel Components. Electric Power Research Institute / Technical Report. November 2011.

REFERENCES

1. Hurtado-Noreña C., Danón C.A., Luppó M.I., Bruzzoni P. Evolution of Minor Phases in a P91 Steel Normalized and Tempered at Different Temperatures. *International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials, SAM-CONAMET*, 2013, pp. 143–146.
2. Khromchenko F.A. *Resurs svarnykh soedinenij paroprovodov* [Resource of welded joints of steam pipelines]. Moscow, Mashinostroenie, 2002, 352 p.
3. Danilov V.I., Drozd M.S., Slavsky Yu.I. Primenenie bezobrazcovogo metoda kontrolya mekhanicheskikh svoystv stalej v usloviyakh metallurgicheskogo proizvodstva [Application of a sample-free method for testing the mechanical properties of steels under metallurgical production conditions]. *Zavodskaya laboratoriya = Factory laboratory*, 1972, no. 2, pp. 217–221.
4. Sidorov V.A., Panteleenko F.I. Operativnaya diagnostika mekhanicheskikh svoystv izdelij [Operational diagnostics of mechanical properties of products]. *Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva: sb. nauch. rabot Rесп. nauch.-tekhn. konf. = Modern technologies for blank production: collection of scientific papers of the Republican scientific and technical conference*. Minsk, BNTU, 2021, pp. 18–20.
5. Poyarkova E.V., Dinmukhametova L.S., Kaleeva Zh.G. *Prochnost' svarnykh konstrukcij: ucheb. posobie* [Strength of welded structures: textbook]. Orsk, Publishing house of the Orsk Humanitarian and Technological Institute (branch) of OSU, 2012, 222 p.
6. Zhdanovich G.M., Khmelev A.A. O vzaimosvyazi plastichnosti i udarnoj vyazkosti malouglerodistykh i nizkolegированных stalej [On the relationship between plasticity and impact toughness of low-carbon and low-alloy steels]. *Metallurgiya: resp. mezhved. sb. nauch. trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, Vyshejschaya shkola Publ., 1988, iss. 22, pp. 22–24.
7. Sidorov V.A., Khmelev A.A. O diagramme hрупkovязкого sostoyaniya malouglerodistykh stalej, opredelennoj po rezul'tatam izmereniya tverdosti [On the diagram of the brittle-ductile state of low-carbon steels determined from the results of hardness measurements]. *Mashinostroenie: resp. mezhved. sb. nauch. trudov = Mechanical Engineering: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers*. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2001, iss. 17, pp. 387–391.
8. Sidorov V.A., Panteleenko F.I. Algoritм ocenki sostoyaniya konstrukcii izmereniem tverdosti po Brinellyu [Algorithm for assessing the state of a structure by measuring Brinell hardness]. *Sovremennye tekhnologii dlya zagotovitel'nogo proizvodstva: sb. nauch. rabot Rесп. nauch.-tekhn. konf. = Modern technologies for blank production: collection of scientific papers of the Republican scientific and technical conference*. Minsk, BNTU Publ., 2023, pp. 94–95.
9. Khmelev A.A., Sidorov V.A. O edinoj zakonmernosti razrusheniya obrazcov razlichnoj formy i razmerov pri udarnom izgibe [On a unified pattern of destruction of samples of different shapes and sizes under impact bending]. *Mashinostroenie: resp. mezhved. sb. nauch. trudov = Mechanical Engineering: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers*. Minsk BNTU Publ., 2005, iss. 21, vol. 2, pp. 32–35.
10. Khmelev A.A., Sidorov V.A. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. *Laboratornye raboty = Laboratory work*. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 206 p.
11. Khmelev A.A., Sidorov V.A. *Mekhanika razrusheniya* [Fracture mechanics]. Minsk, BNTU Publ., 2007, 236 p.
12. Panteleenko F.I. [et al.] *Mekhanika razrusheniya i mekhanicheskie svoystva materialov: posobie dlya studentov special'nosti 1–36 01 06 "Oborudovanie i tekhnologiya svarochnogo proizvodstva"* [Fracture mechanics and mechanical properties of materials: a manual for students majoring in 1–36 01 06 "Equipment and technology of welding production"]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 207 p.
13. GOST 6996–66. *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv* [Welded joints. Methods for determining mechanical properties]. Moscow: Publishing house of standards, 1966, 28 p.
14. Panteleenko F.I., Sidorov V.A., Khmelev A.A. Udel'naya rabota plasticheskogo deformirovaniya stali kak kriterij ocenki ee kachestva [Specific work of plastic deformation of steel as a criterion for assessing its quality]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii: materialy Mezhdunar. simpoziuma = Advanced materials and technologies: materials of the International symposium*. Minsk, 2021, pp. 49–50.
15. Guidelines and Specifications for High-Reliability Fossil Power Plants: Best Practice Guideline for Manufacturing and Construction of Grade 91 Steel Components. Electric Power Research Institute / Technical Report. November 2011.