

DOI 10.8562/JEST.214.21
УДК 620.171.2

*Д.Г. Плотников, С.А. Соколов,
А.И. Боровков, А.А. Михайлов*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

*D.G. Plotnikov, S.A. Sokolov,
A.I. Borovkov, A.A. Michailov*

STRENGTH ESTIMATION METHOD FOR METAL STRUCTURES OF HOISTING EQUIPMENT

Предложена методика оценки прочности и пластических свойств сварных узлов подъемно-транспортных машин с учетом концентрации напряжений и металлургических сварочных факторов. Разработана конструкция образца для статических испытаний. Проведены натурные испытания при нормальной температуре и численное исследование напряженно-деформированного состояния зоны разрушения методом конечных элементов. Определены предельные характеристики пластичности сварного соединения.

СТАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ; СВАРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ; ИСПЫТАНИЕ; ПЛАСТИЧНОСТЬ; ПРОЧНОСТЬ; МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

The main problem considered in this article is prediction of strength for welding structures of hoisting equipment. Developed is a method of estimation of plastic strain limits for welding structures that takes into account all the most important factors influencing strength and plastic properties of a welding joint (such as stress concentration factors and residual stresses, environment temperature). These factors are implemented with the help of a special welded model. The static test, described in this article, was conducted at normal temperature. Analysis of the stress-strain state of the fracture area is based on the finite element method. As a result of investigation the limits of the plasticity of the welding joint were estimated.

STEEL STRUCTURE, WELDING JOINT, TESTING, PLASTICITY, STRENGTH, FINITE ELEMENT METHOD.

Основным условием работоспособности металлических конструкций машин, используемым в процессе проектирования, является условие прочности. Существующие инженерные методы прогнозирования прочности металлических конструкций подъемно-транспортных машин при однократном максимальном нагружении оперируют номинальными расчетными напряжениями [1–4, 7]. При этом они базируются на допущении о том, что запас пластичности материала достаточен для того, чтобы обеспечить протекание локальных пластических деформаций в зонах концентрации напряжений без снижения несущей способности конструкции. Для этого выбирают стали, которые сохра-

няют достаточно высокую ударную вязкость при низких температурах [1–4, 10]. Причем температура испытаний назначается с учетом факторов, способствующих возникновению хрупкого разрушения, которые учитываются с помощью условных балльных оценок их значимости [3, 4, 10].

Как показывает практика, такой подход не гарантирует надежности конструкции в условиях эксплуатации. Наиболее остро это проявляется в конструкциях подъемно-транспортных машин, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур и подвергаемых интенсивному динамическому нагружению. Даже в условиях нормальной эксплуатации машин встречаются ситуации, в которых возникают не-

благоприятные комбинации факторов, затрудняющих развитие пластических деформаций, приводящие к возникновению хрупкого разрушения сварных узлов и аварии всего сооружения. Это объясняется тем, что данная методика выбора стали базируется на качественных оценках свойств сварных соединений, а стандартные образцы не отражают реальные условия деформирования стали в зоне сварочного концентратора.

Другой аспект той же проблемы связан с внедрением метода конечных элементов в инженерную практику расчета металлических конструкций машин. Этот расчет дает оценку истинного напряженно-деформированного состояния конструкции, при которой исчезает понятие номинальных напряжений. При этом использование максимальных местных напряжений в нормативных условиях прочности приводит к неоправданному завышению запасов прочности и металлоемкости конструкций.

Для адекватного решения указанных проблем необходимо условие прочности, учитывающее особенности процессов деформирования стали в сварном узле. В зависимости от конструкции узла и условий нагружения в одних случаях может возникнуть местная пластическая деформация, в других — разрыв материала или хрупкое разрушение. Защита конструкции от хрупкого разрушения имеет большое практическое значение. Актуальность решения данной проблемы особо возрастает в связи с расширением выпуска техники для эксплуатации в условиях холодного климата.

Целью данной работы является методика оценки прочности металлических конструкций подъемно-транспортных машин с использованием деформационного критерия. Для реализации этого подхода разработана расчетно-экспериментальная методика определения предельной пластической деформации сварного узла с учетом его конструктивно-технологических особенностей и условий эксплуатации. Предлагаемая методика построена на объединении возможностей физического и численного эксперимента.

Методика экспериментального исследования

Прочность сварного узла в условиях эксплуатации зависит от совокупности факторов:

механических свойств материала в зоне сварного шва;

характера напряженного состояния в зоне концентрации напряжений от эксплуатационных нагрузок и поля остаточных напряжений; температуры эксплуатации; скорости деформирования материала.

Задача разработки методики определения критерия разрушения заключалась в учете совокупности этих факторов. Методика исследования включает механические испытания сварных образцов и численное моделирование процесса нагружения с использованием результатов испытания. Для решения этой задачи была разработана конструкция тестового образца, обеспечивающего максимально неблагоприятные условия деформирования сварного узла, методика его испытания и анализа локальных пластических деформаций в зоне концентрации напряжений.

Конструкция образца построена таким образом, что в зоне термического влияния, имеющей обычно наихудшую пластичность, формируется трещиноподобный концентратор напряжений. Тестовый образец представляет собой сварную конструкцию, состоящую из двух пластин, *1a* и *1b*, и накладки *2*, являющейся испытываемым элементом (рис. 1). Накладка имеет разделку по продольным кромкам и соединяется с пластинами *1a* и *1b* сварным швом с обваркой по контуру. Сборка образца для сварки осуществляется таким образом, что торцы пластин *1a* и *1b* плотно прижимаются друг к другу, образуя концентратор, подобный трещине. В этом образце нагрузка на основную пластину *2* в центральном сечении передается через сварные швы, при этом вершина концентратора оказывается в зоне термического влияния в корне шва. Характер (объемность) напряженного состояния и, следовательно, условия деформирования в зоне разрушения зависят от толщин элементов, поэтому все размеры нормированы по толщине основного элемента *2* (рис. 1). При этом толщина *t* должна быть равна наибольшей толщине проката, используемого в натурной конструкции.

Конструкция этого образца обеспечивает максимальную концентрацию напряжений, так как радиус закругления надреза близок к нулю. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния образца показал, что коэффициент жесткости напряженного состояния в зоне концентратора превышает зна-

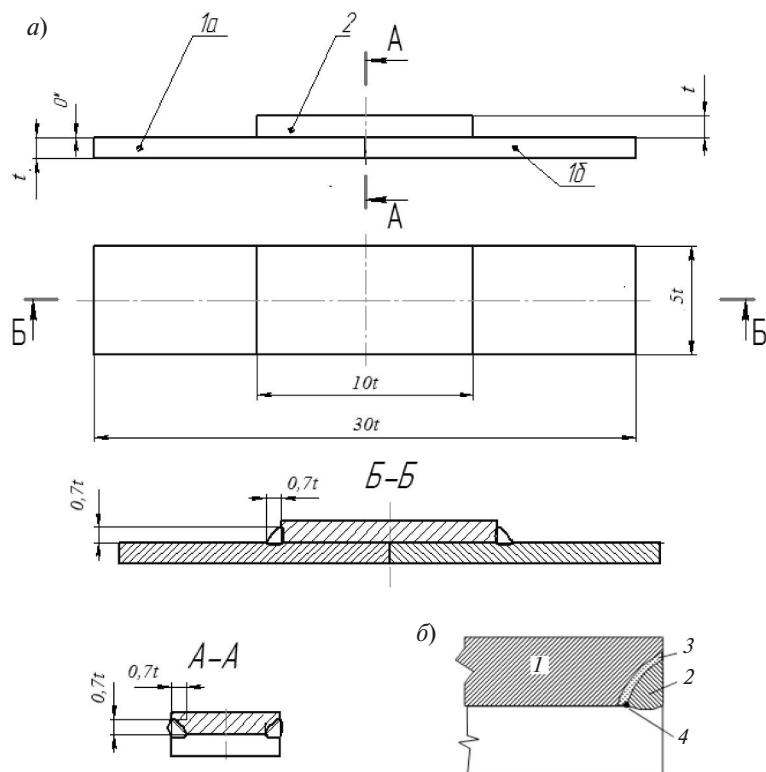


Рис. 1. Образец для испытаний: *a* — чертеж образца; *б* — схема распределения зон в образце: 1 — основной металл пластин; 2 — наплавленный металл; 3 — зона термического влияния; 4 — точка максимальной концентрации напряжений

чения, характерные для качественных сварных узлов. Кроме того продольный сварной шов создает значительные остаточные напряжения.

Для экспериментального исследования использован образец, все элементы которого были вырезаны из листовой стали марки СтЗсп толщиной 20 мм. Испытания проводились на разрывной машине Instron KN с максимальным усилием 600 кН. Продольная нагрузка передавалась на образец через хвостовые пластины, которые зажимались в захватах разрывной машины. При этом фиксировалась диаграмма растяжения в координатах «перемещение захватов — нагрузка». Испытание производилось при нормальной температуре +23 °С, скорость перемещения захватов составляла 20 мм/с. В результате нагружения образца до усилия 580 кН он деформировался с изгибом в центральном сечении при суммарном перемещении захватов $\delta = 8$ мм. Образец не разрушился, нагружение прекратилось из-за исчерпания возможности

разрывной машины. Раскрытие стыка составило 6 мм, в основании концентратора образовались надрывы материала глубиной 4 мм.

Для определения механических свойств стали были проведены испытания стандартных цилиндрических образцов основного металла и зоны термического влияния по ГОСТ 1497–84. Испытания показали, что основной металл имеет предел текучести $\sigma_T = 310$ МПа, временное сопротивление $\sigma_B = 500$ МПа, относительное удлинение $\delta_5 = 0,3$. Металл зоны термического влияния имеет предел текучести $\sigma_T = 403$ МПа, временное сопротивление $\sigma_B = 575$ МПа, относительное удлинение $\delta_5 = 0,21$.

Для того, чтобы получить данные о локальных процессах деформирования в вершине концентратора и определить значения предельных пластических деформаций, был выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния образца. С этой целью разработана методика численного эксперимен-

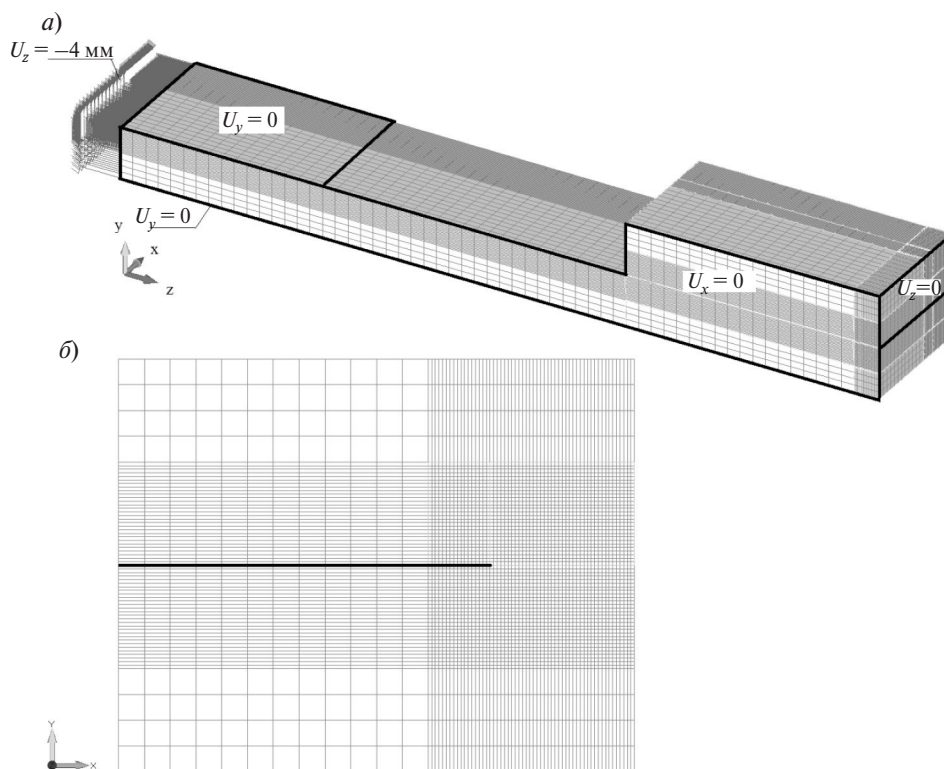


Рис. 2. Конечно-элементная модель: а — общий вид; б — конечно-элементная сетка в зоне вершины концентратора

та, обеспечивающая расчет упруго-пластического напряженно-деформированного состояния образца, параметры которого характеризуются большими абсолютными значениями и градиентами. Расчет выполнялся средствами ПО Femap с решателем NX Nastran. Далее в тексте в качестве характеристики пластической деформации используется интенсивность пластической деформации, при этом для краткости слово «интенсивность» опускается.

Конечно-элементная модель строилась с учетом симметрии образца, поэтому соответствовала только его четверти (рис. 2). Свойства симметрии были реализованы с помощью граничных условий (на плоскости YZ перемещение $U_x = 0$, на плоскости XU перемещение $U_z = 0$). В связи с тем, что поле напряжений и деформаций в зоне концентратора имеет весьма значительные градиенты, достоверность результатов расчета существенно зависит от качества конечно-элементной сетки. Поэтому разбивка была выполнена таким образом, чтобы в вершине трещиноподобного концентратора обеспечива-

лась регулярная сетка и размер элемента не больше $0,02a$ (где a — характерный размер трещины, в данном случае равный толщине листа 20 мм). Для построения модели использовались линейные элементы типа SOLID (CHEXA) с 8 узлами. Материалы основных элементов и зоны термического влияния принимались изотропными с билинейными диаграммами механических свойств [9], которые строились на основании данных, полученных при испытании цилиндрических образцов. Для обоих материалов модуль упругости принимался равным $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1000$ МПа.

Поле остаточных сварочных напряжений в образце создавалось путем моделирования термомеханического цикла сварки. Он включал нагрев материала сварного шва от температуры окружающей среды 20 °С до 1500 °С и последующее его остывание до температуры 20 °С. Коэффициент теплового расширения линейно возрастал от $11,5 \cdot 10^{-6}$ при температуре 20 °С до $18,9 \cdot 10^{-6}$ при температуре 1500 °С. Граничные условия определялись свойствами симметрии

образца. В результате этого расчета максимальные значения остаточных сварочных напряжений в зоне концентрации достигали 239 МПа, что составляет 80 % от предела текучести основного металла.

Моделирование захватов в процессе нагружения модели осуществлялось с помощью граничных условий, обеспечивавших поступательное перемещение захватной части образца ($U_y = 0$, $U_z = 0$ на поверхностях, контактирующих с захватами). При этом захваты и элементы разрывной машины, связывающие их с датчиком перемещений, предполагались абсолютно жесткими. Нагружение модели было кинематическим, то есть задавалось монотонное перемещение, и вычислялась требуемая сила. Расчет производился по стандартному алгоритму расширенного нелинейного статического анализа SOL600 в NX Nastran.

Анализ результатов

В результате численного анализа получено поле напряжений и деформаций в модели, построен график «перемещение захватов — нагрузка», который сопоставлен с экспериментальным (рис. 3). Как видно из графиков, общая картина процесса деформирования образца удовлетворительно описывается численным расчетом. Имеется расхождение графиков в области малых деформаций. Это можно объяснить влиянием упругих деформаций захватов на начальном участке нагружения.

Локальными характеристиками напряженно-деформированного состояния в концентраторе являются интенсивность пластической деформации e_{pl} и коэффициент жесткости напряженного состояния η . Интенсивность пластических деформаций вычисляется как

$$e_{pl} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{p1} - e_{p2})^2 + (e_{p2} - e_{p3})^2 + (e_{p3} - e_{p1})^2},$$

где e_{p1} , e_{p2} , e_{p3} — значения главных пластических деформаций в элементе.

Коэффициент жесткости напряженного состояния определяется как $\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_{vm}}$ [6], где σ_1 — первое главное напряжение; σ_{vm} — эквивалентное напряжение, вычисленное согласно теории прочности Мизеса — Генки.

Для анализа сходимости решения и оценки предельной пластической деформации в сечении А-А (рис. 1, в) был проведен анализ трех вариантов моделей с минимальными размерами элементов 0,25 мм, 0,5 мм и 1 мм. По результатам этих расчетов построена зависимость максимальных пластических деформаций, соответствующих перемещению захватов на 8 мм, от размера элемента (рис. 3, б). Деформации усреднялись в объеме куба со стороной 1 мм. Расчетное значение пластических деформаций определялось с помощью экстраполяции на размер элемента, равного нулю. Таким образом, было получено значение предельной пластической деформации $e_{plc} = 0,44$. Размер пластической зоны при максимальной нагрузке составил $r_{пл} = 13,8$ мм. Максимальное значение коэффициента жесткости напряженного состояния в процессе деформирования с увеличением нагрузки изменяется от 2,5 до 1,7.

Таким образом, методика решения вопроса о возможности использования конкретной стали с определенной сварочной технологией для изготовления сварных конструкций включает следующие мероприятия. Необходимо изготовить серию образцов указанной конфигурации из проката наибольшей толщины с применением тех же сварочных процедур. Провести их испытания при минимальной эксплуатационной температуре по ГОСТ 15150. По результатам испытаний рассчитать значение предельных пластических деформаций в образце. Полученные данные позволят применить для сварных конструкций деформационный критерий прочности в форме [6]

$$e_{pl} \leq e_{plc} / n,$$

где n — коэффициент запаса прочности. Это значит, что запас пластичности проектируемой конструкции следует считать достаточным, если максимальные пластические деформации в наиболее нагруженных узлах от действия расчетных эксплуатационных нагрузок, вычисленные методом конечных элементов, будут не больше предельной пластической деформации, полученной на образце. В данной методике конфигурация сварного узла и условия нагружения учитываются конечно-элементным расчетом конструкции, а свойства материала в зоне сварного шва и условия его деформирования — результатами испытаний сварного об-

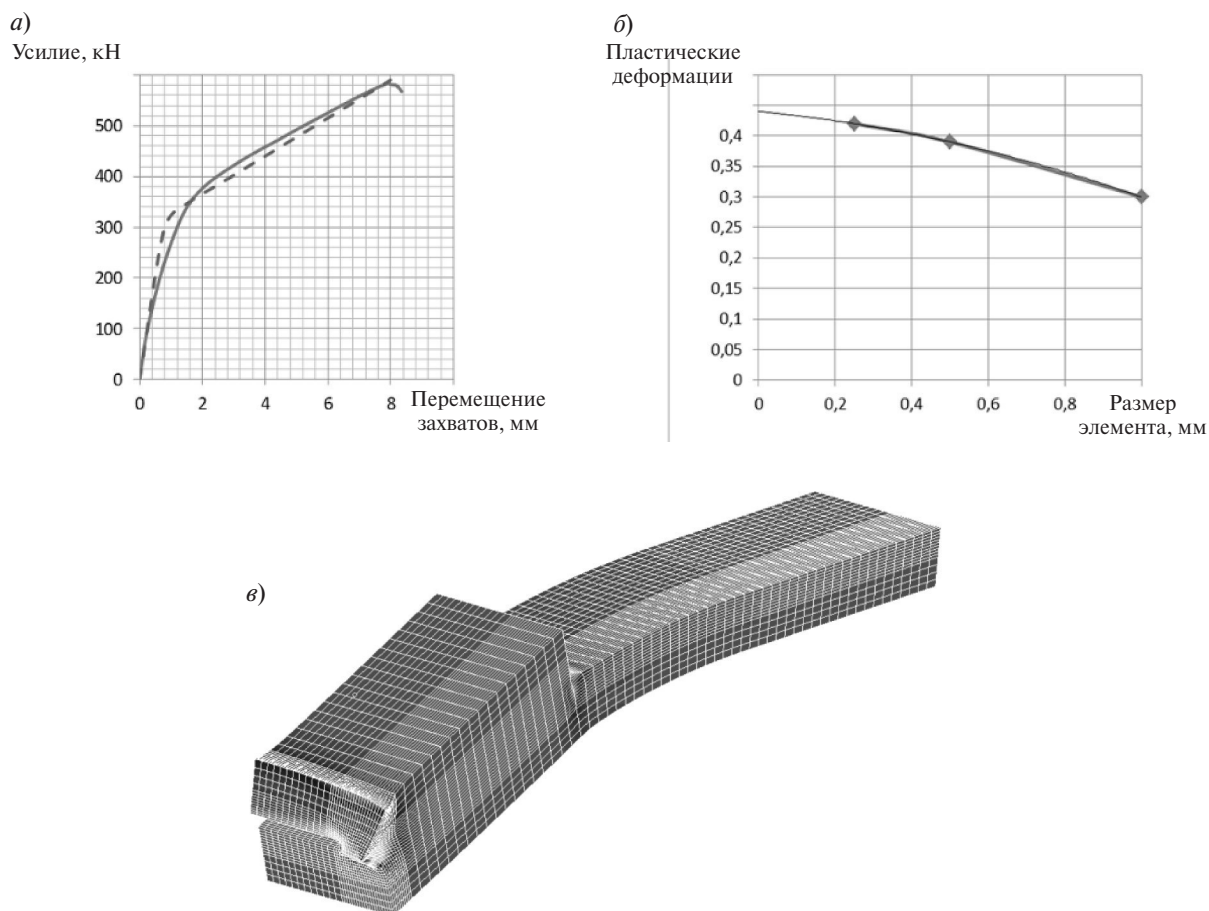


Рис. 3. Результаты расчета: *a* — диаграмма нагружения образца, экспериментальная и расчетная; *б* — зависимость расчетной максимальной пластической деформации от размера элемента; *в* — деформированная конечно-элементная модель (— — эксперимент; — — расчет)

разца. Применение предложенной методики дает возможность учитывать комплексное влияние всех факторов, способствующих возникновению хрупкого разрушения конструкции.

Результаты проведенного эксперимента сопоставлены с оценкой предельных деформаций по методике Н.А. Махутова. Согласно [5] предельное значение интенсивности пластической деформации может быть представлена в виде $e_k = e_{k1} D_e(\eta)$, где e_{k1} — предельная пластическая деформация, определенная при одноосном растяжении образца цилиндрической формы; D_e — коэффициент снижения предельной пластической деформации; η — коэффициент жесткости напряженного состояния.

На основании работы [5] построена приближенная зависимость коэффициента снижения предельной пластической деформации от коэффициента жесткости напряженного со-

стояния. При нормальной температуре испытаний и при соотношении компонентов тензора главных напряжений, характерном для зон концентрации напряжений, коэффициент снижения пластических деформаций может быть описан аппроксимирующей зависимостью следующего вида:

$$D_e(\eta) = \frac{1,2}{\eta^2}. \quad (1)$$

Предельное значение интенсивности пластической деформации для испытанного образца можно оценить по методике [5], используя значение коэффициента жесткости, полученное из численного анализа, и значение предельной пластической деформации e_{k1} , определенное по результатам испытания цилиндрических образцов. В результате вычислений получаем $e_k = 0,38$. Таким образом, аналитическая оценка предель-

ной пластической деформации в образце весьма близка к максимальному значению интенсивности пластической деформации, полученному с помощью конечно-элементного расчета — $\epsilon_k = 0,44$, то есть отличается на 14 %. Расхождение можно объяснить тем, что разрывы, вероятно, появились в концентраторе не при максимальном перемещении захватов, а несколько раньше, что невозможно зафиксировать при большой скорости нагружения.

Удовлетворительная сходимость расчета по методике [5] с результатом проведенного эксперимента показывает, что данная зависимость, выведенная для деталей машин с геометрическими концентраторами, может быть применена для оценки снижения пластичности сварных узлов при положительных температурах. В расчетах конструкций она может быть использована в сочетании с экспериментальными данными, отражающими влияние низких температур на пластичность материала.

Выводы и рекомендации

Для оценки прочности металлических конструкций подъемно-транспортных машин рекомендовано использовать деформационный критерий, в котором предельная пластическая деформация сварного узла находится по предложенной расчетно-экспериментальной методике, учитывающей его конструктивно-технологические особенности и условия эксплуатации. Применение данной методики позволяет учесть совокупность негативных факторов хрупкого разрушения.

Испытание образца и численный анализ показали, что предложенная конструкция образца обеспечивает максимально высокое значение коэффициента жесткости напряженного состояния $\eta \approx 2$. Полученное значение существенно выше, чем в качественно выполненных сварных узлах, где $\eta = 1,2-1,4$, и соответствует тому, что имеет место в технологических дефектах (непроварах), трещинах и ремонтных швах низкого качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 24.090.52–90. Подъемно-транспортные машины. Материалы для сварных металлических конструкций / ВНИИПТМАШ. М., 1990.
2. РД 22–16–2005. Машины грузоподъемные. Выбор материала для изготовления, ремонта и реконструкции сварных стальных конструкций / ФГУП СКТБ БК. 2005.
3. Federation Europeenne de la manutention. Section I: FEM 1.001. Rules for the design of hoisting appliances. 3rd Edition. 10.1998
4. ISO 20332. Cranes — Proof of competence of steel structures. First edition 2008–12–15.
5. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
6. Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций: Учебное пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Издательство «Лань», 2010. 457 с.
7. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
8. Одесский П.Д., Ведяков И.И., Горпинченко В.М. Предотвращение хрупких разрушений металлических строительных конструкций. М: Изд-во СП Интермет Инжиниринг, 1998. 220 с.
9. Ullner C., Bruser S., Subaric-Leitis A., Rethmeier M. Determination of local stress-strain properties of resistance spot-welded of advanced high-strength steels using the instrumented indentation test. / - Journal of Materials Science. Vol. 47. Issue 3. 2012. P. 1504–1513.
10. ГОСТ 32578–2013. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Требования к материалам, 2013.

REFERENCES

1. RD 24.090.52–90. Podyemno-transportnyye mashiny. Materialy dlya svarnykh metallicheskikh konstruktsiy / [RD 24.090.52–90. Hoisting equipment. Materials for welding metal structures] / VNIPTMASH. M., 1990. (rus.)
2. RD 22–16–2005. Mashiny gruzopodyemnyye. Vybora materiala dlya izgotovleniya, remonta i rekonstruktsii svarnykh stalnykh konstruktsiy / [RD 22–16–2005. Hoisting equipment. Choice of materials for repair and reconstruction of welding metal structures] / FGUP SKTБ BK, 2005. (rus.)
3. Federation Europeenne de la manutention. Section I: FEM 1.001. Rules for the design of hoisting appliances. 3rd Edition. 10.1998. (rus.)
4. ISO 20332. Cranes - Proof of competence of steel structures. First edition 2008–12–15.
5. Makhutov N.A. Deformatsionnyye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost. [De-



formation fracture criterion and structure analysis of metal structures]. M.: Mashinostroyeniye, 1981. 272 s. (rus.)

6. **Kopelman L.A.** Osnovy teorii prochnosti svarynykh konstruksiy: Uchebnoye posobiye. 2-ye izd., ispr. [Foundations of the theory of strength for welding structures].: SPb. Izd-vo «Lan», 2010. 457 s. (rus.)

7. **Sokolov S.A.** Metallicheskiye konstruksii podyemno-transportnykh mashin. [Metal structures of hoisting equipment]. SPb.: Politekhnik, 2005. 423 s. (rus.)

8. **Odesskiy P.D., Vedyakov I.I., Gorpichenko V.M.** Predotvrashcheniye khrupkikh razrusheniy metalli-

cheskikh stroitelnykh konstruksiy / [Prevention of brittle fracture of metal structures]. M.: Izd-vo SP Intermet Inzhiniring, 1998. 220 s. (rus.)

9. **Ullner S., Bruser S, Subaric-Leitis A., Rethmeier M.** Determination of local stress-strain properties of resistance spot-welded of advanced high-strength steels using the instrumented indentation test. *Journal of Materials Science*. Vol. 47. Issue 3. 2012. P. 1504–1513 (rus.)

10. **GOST 32578–2013.** Krany gruzopodyemnyye. Metallicheskiye konstruksii. Trebovaniya k materialam/ [GOST 32578–2013 Cranes. Metal structures. Requirements for materials]. 2013. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: dg-plotnikov@mail.ru

СОКОЛОВ Сергей Алексеевич — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: sokolov-sa@rambler.ru

БОРОВКОВ Алексей Иванович — кандидат технических наук профессор проректор по перспективным проектам Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: vicerektor.ap@spbstu.ru

МИХАЙЛОВ Александр Александрович — ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: Michailov@CompMechLab.com

AUTHORS

PLOTNIKOV Dmitry G. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: dg-plotnikov@mail.ru

SOKOLOV Sergey A. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: sokolov-sa@rambler.ru

BOROVKOV Alexey I. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: vicerektor.ap@spbstu.ru

MICHAILOV Alexandr A. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Michailov@CompMechLab.com