

УДК 62-192

ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛОВ СОЕДИНЕНИЙ СЕКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ СТРЕЛ КРАНО-МАНИПУЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК МОБИЛЬНЫХ МАШИН

И.А. Лагереv

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

Обоснован новый конструктивный способ повышения трещиностойкости и живучести проушин шарнирного соединения секций стрелы крана-манипулятора с силовыми гидроцилиндрами. Выполнен анализ его эффективности на основе прогнозирования роста усталостных трещин для традиционного и модифицированного вариантов конструктивного исполнения узлов соединения гидроцилиндров с секциями стрелы.

Ключевые слова: крано-манипуляторная установка, трещиностойкость, живучесть, плоское напряженное состояние, плоская деформация, скорость роста трещины, коэффициент интенсивности напряжений, проушина

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук № МК-92.2014.8.

В конструкциях крано-манипуляторных установок мобильных машин, предназначенных для механизации широкого круга погрузочно-разгрузочных, перегрузочных, транспортных, складских и строительно-монтажных работ практически во всех отраслях современной экономики, нашли преимущественное распространение шарнирно-сочлененные грузоподъемные стрелы, состоящие из нескольких последовательно закрепленных между собой секций [1-3]. Как правило, взаимное поворотное или линейное смещение смежных секций в процессе перемещения грузозахватного органа в пространстве обеспечивается работой силовых гидроцилиндров. У каждого гидроцилиндра его корпус и выходной конец штока имеют неподвижное закрепление на металлоконструкции смежных секций грузовой стрелы, причем обеспечивается цилиндрическое шарнирное соединение между гидроцилиндром и секцией. На рис. 1 в качестве примера показана шарнирно-сочлененная грузоподъемная стрела крано-манипуляторной установки мобильной энергетической машины АСТ-4-А для сварки магистральных трубопроводов [4].

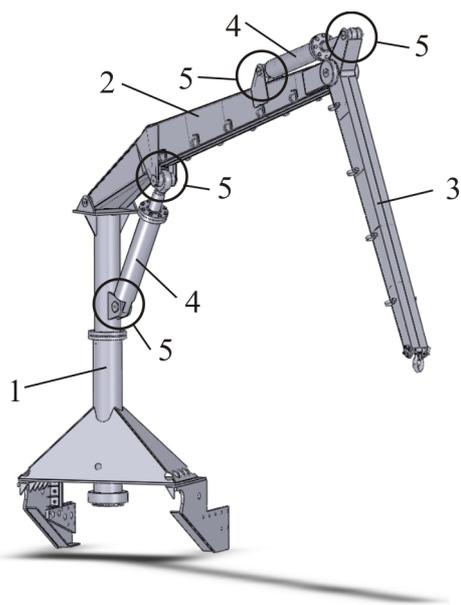


Рис. 1. Конструкция стрелы машины АСТ-4-А:
1 – колонна; 2 – секция №1; 3 – секция №2;
4 – гидроцилиндр; 5 – узел крепления

Конструктивно цилиндрические шарниры представляют собой по две проушины, которые попарно неподвижно закреплены посредством сварки на поверхности металлоконструкций смежных секций стрелы. Они выполняются из толстостенного листового проката и имеют соосные отверстия для установки в них соединительной оси, что и обеспечивает формирование цилиндрического шарнирного соединения. В процессе эксплуатации крано-манипуляторной установки проушины являются одними из наиболее нагруженных конструктивных элементов шарнирного соединения, так как в них действуют переменные во времени напряжения от статических и инерционных усилий, обусловленные весом и неравномерным движением груза и части секций грузоподъемной стрелы. Как результат, в перемычках проушин возможно появление и последующее развитие усталостных трещин (рис. 2), что является потенциальным источником уста-

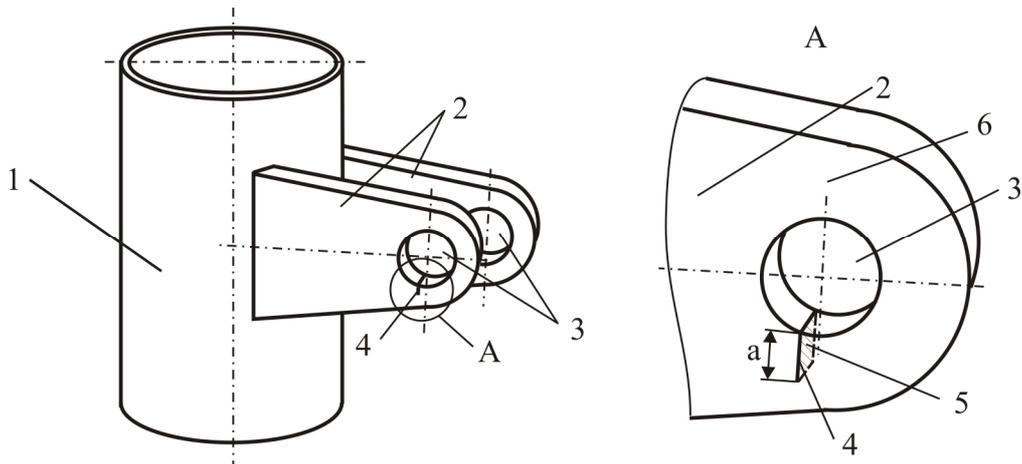


Рис. 2. Трещина в перемычке проушины узла крепления силового гидроцилиндра к металлоконструкции секции грузоподъемной стрелы:

1 – секция стрелы; 2 – проушина; 3 – отверстие для формирования шарнирного соединения; 4 – трещина; 5 – плоскость трещины; 6 – перемычка проушины

лостного разрушения шарнирного соединения и возникновения аварийной ситуации.

С целью повышения надежности работы узлов соединений секций грузовых стрел в [5, 6] был предложен конструктивный способ повышения трещиностойкости и живучести проушин шарнирного соединения секции с силовым гидроцилиндром. Суть указанного способа заключается в том, что со стороны одной из боковых плоскостей проушины в ее перемычках выполняется расположенный радиально относительно отверстия паз глубиной не менее $2/3 \dots 3/4$ толщины листового проката, который затем наплавляется материалом, имеющим коэффициент ударной вязкости выше, чем коэффициент ударной вязкости основного материала проушины (рис. 3, а). Как вариант исполнения, со стороны обеих боковых плоскостей проушины могут выполняться симметрично два паза, имеющих одинаковую глубину, ширину и форму поперечного сечения, причем суммарная глубина обоих пазов составляет не менее $2/3 \dots 3/4$ толщины листового проката (рис. 3, б).

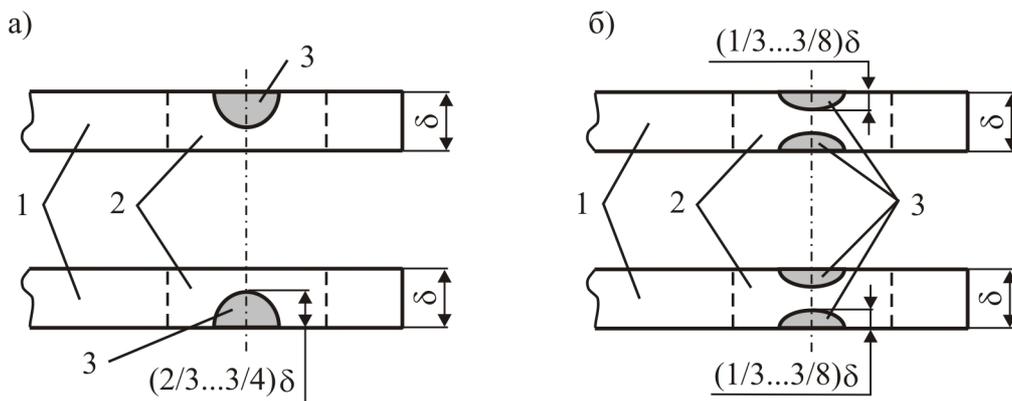


Рис. 3. Конструктивное исполнение способа повышения трещиностойкости и живучести проушины: а – расположение пазов с одной боковой плоскости; б – расположение пазов с обеих боковых плоскостей: 1 – проушина; 2 – отверстие в проушине; 3 – паз с наплавленным материалом повышенной трещиностойкости

В основу предложенного подхода положен эффект уменьшения скорости роста усталостных трещин при наличии плоского напряженного состояния вблизи ее вершины [7]. В этом случае площадь зоны пластичности r_p у вершины трещины оказывается в несколько раз больше, чем в условиях плоской деформации. Согласно [8] для металлов и сплавов при коэффициенте Пуассона $\nu = 0,25$ соотношение размеров зоны пластичности в направлении роста трещины при плоском напряженном состоянии и плоской деформации составляет 4:1,

при $\nu = 0,25 - 9:1$, при $\nu = 0,35 - 11:1$. Поэтом в условиях плоского напряженного состояния для роста трещины многоциклового усталости требуется большее количество подводимой энергии, так как она главным образом расходуется на постоянное формирование зоны пластичности вблизи вершины растущей трещины.

Известны результаты многочисленных экспериментальных исследований по разрушению пластин и панелей, проведенных как отечественными [7, 9], так и зарубежными [10] исследователями, согласно которым существует зависимость между их толщиной и характеристиками разрушения – критическим коэффициентом интенсивности напряжений в вершине трещины K_{Ic} и скоростью ее роста da/dt . Исследования показали, что имеется оптимальная толщина пластины, при которой K_{Ic} достигает своего максимального значения $(K_{Ic})_{max}$. Удовлетворительного объяснения указанного явления пока не найдено, однако предложено несколько полуэмпирических теорий, позволяющих прогнозировать изменение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины в зависимости от толщины пластины.

Согласно модели Д. Броека [10], соотношение между критическим коэффициентом интенсивности напряжений при переходном напряженном состоянии и плоской деформацией в случае $B_0/B \leq 1$ составляет:

$$\frac{K_{Ic}}{K_{Ic}} = \sqrt{1 + \frac{\varepsilon_f EB_0}{24\sigma_T B}}, \quad (1)$$

где B - толщина пластины; B_0 - наибольшая толщина пластины, при которой полностью развивается плоское напряженное состояние; K_{Ic} - критический коэффициент интенсивности напряжений материала при плоской деформации; ε_f - истинная деформация разрушения материала; σ_T , E - предел текучести и модуль упругости материала пластины.

Условие $B_0/B = 1$ соответствует случаю плоского напряженного состояния, для которого $K_{Ic} = (K_{Ic})_{max}$. Из рис. 4, на котором показана зависимость $K_{Ic} = K_{Ic}(B/B_0)$ для углеродистой конструкционной стали Ст3, видно, что коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины при плоском напряженном состоянии $(K_{Ic})_{max}$ в 3,1 раза больше коэффициента интенсивности напряжений при плоской деформации K_{Ic} .

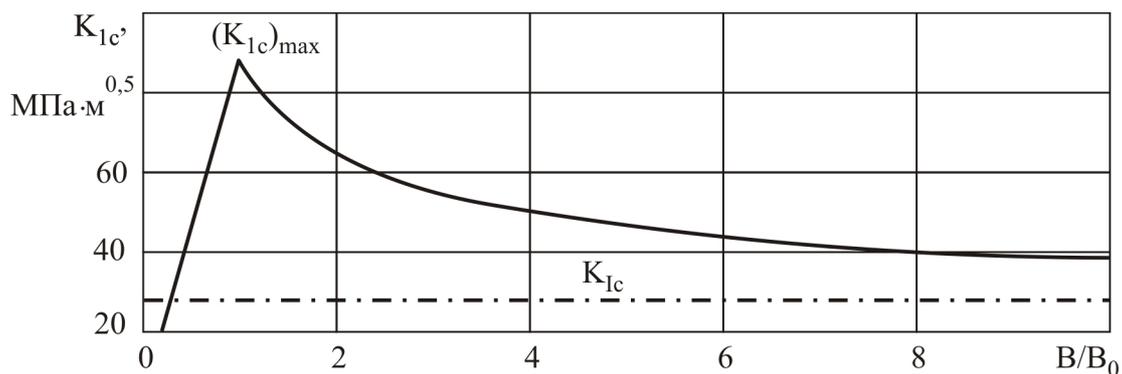


Рис. 4. Зависимость $K_{Ic} = K_{Ic}(B/B_0)$ для углеродистой конструкционной стали Ст3, построенная на основе расчета по формуле (1)

Анализ применяющихся для изготовления металлоконструкций грузоподъемных стрел углеродистых и низколегированных сталей показывает, что развивающиеся в них в процессе эксплуатации трещины многоциклового усталости развиваются в условиях плоской деформации или в переходной зоне, т.е. в интервале толщин прокатного профиля

$$B \in \left[B_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_T} \right)^2 ; B_I = 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_T} \right)^2 \right],$$

где B_I - наименьшая толщина пластины, при которой полностью развивается плоская деформация.

Следовательно, проушины в узлах крепления силовых гидроцилиндров к секциям грузовой стрелы обладают либо минимально возможной, либо пониженной трещиностойкостью.

В случае реализации предложенного в [5] подхода остаточная толщина перемычки проушины в зоне расположения паза обеспечивает максимально возможную трещиностойкость $(K_{Ic})_{\max}$, которая в наиболее благоприятном случае в $\sqrt{1 + \varepsilon_f E / 24 \sigma_T}$ раз превышает критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} .

В общем случае, когда остаточная толщина перемычки проушины в зоне расположения паза (рис. 3, а) или двух пазов, расположенных на противоположных боковых поверхностях проушины (рис. 3, б), может соответствовать переходной зоне, критический коэффициент напряжений материала проушины может быть приближенно рассчитан по зависимости, вытекающей из соотношения (1):

$$K_{Ic} = K_{Ic} \sqrt{1 + \frac{\varepsilon_f E K_{Ic}^2}{72(1 - \varphi_p) \delta \sigma_T^3}}, \quad (2)$$

где δ - толщина проушины; φ_p - коэффициент относительной глубины паза или суммарной глубины двух пазов, который рекомендуется как $\varphi_p = (2/3 \dots 3/4) \delta$.

Зависимость (2) также служит основанием для подбора той марки стали или сплава повышенной ударной вязкости, которая должна быть наплавлена в паз проушины для сохранения целостности поперечного сечения перемычки. Очевидно, в качестве такого материала следует использовать материал, у которого критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} приблизительно соответствует (чуть ниже или выше) величины K_{Ic} , определенной по зависимости (2).

Для количественной оценки эффективности предложенного способа повышения ресурса проушин был рассмотрен узел крепления силового гидроцилиндра к металлоконструкции колонны грузоподъемной стрелы крано-манипуляторной установки мобильной энергетической машины АСТ-4-А для сварки магистральных трубопроводов [4], конструкция которого показана на рис. 2. Материал проушины – низколегированная конструкционная сталь 09Г2С (класс прочности 390). Согласно [11] широкополосный листовой прокат, относящийся к 390 классу прочности, имеет предел текучести $\sigma_T = 390$ МПа, предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_B = 530$ МПа, относительное удлинение 18%. В расчетах также было принято для материала проушины при исходном варианте ее конструктивного исполнения: предел выносливости материала - $\sigma_{-1} = 245$ МПа, критический и пороговый коэффициенты интенсивности материала - $K_{Ic} = 40$ МПа·м^{0,5} и $K_{Ith} = 9,5$ МПа·м^{0,5}. Так как при модернизированном варианте конструктивного исполнения проушины расчет по формуле (2) показал значение критического коэффициента интенсивности напряжений $K_{Ic} \sim 72$ МПа·м^{0,5}, то в качестве материала для наплавки паза была выбрана низколегированная сталь перлитного класса 30ХГСА ($K_{Ic} = 71$ МПа·м^{0,5}). Поэтому для материала проушины при модернизированном варианте ее конструктивного исполнения было принято: предел выносливости материала - $\sigma_{-1} = 325$ МПа, критический и пороговый коэффициенты интенсивности материала - $K_{Ic} = 71$ МПа·м^{0,5} и $K_{Ith} = 7,6$ МПа·м^{0,5}.

Расчет ресурса проушины для ее исходного и модернизированного конструктивного исполнения проводился в соответствии с методикой, предложенной в [12]. Зависимость для расчетной оценки ресурса T_p имеет вид

$$T_p = \tau_1 + \frac{1}{C\nu} \int_{a_{th}}^{\varphi[a]} \frac{K_c - K_{\max}}{\Delta K^n} da, \quad (3)$$

где τ_1 - продолжительность стадии зарождения усталостной микротрещины; a_{th} - пороговая длина усталостной трещины; $[a]$ - предельно допустимая длина усталостной трещины в перемычке проушины; φ - коэффициент безопасности для предельно допустимой длины трещины; ν - частота приложения переменной во времени эксплуатационной нагрузки; a - длина трещины; K_c - критический коэффициент интенсивности напряжений для материала проушины; K_{\max} - коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины для максимального значения нагрузки цикла; ΔK - размах коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины; C, n - эмпирические коэффициенты в зависимости Формана для прогнозирования скорости роста трещины [9], характеризующие свойства материала проушины.

Количественно эффективность предложенного способа удобно выразить коэффициентом повышения ресурса проушины, который имеет следующий вид:

$$\xi = \frac{T_{p,m}}{T_{p,b}} = \frac{\tau_{1,m} + \frac{1}{C_m \nu} \int_{a_{th,m}}^{\varphi[a]_m} \frac{K_{Ic,m} - K_{\max}}{\Delta K^{n_m}} da}{\tau_{1,b} + \frac{1}{C_b \nu} \int_{a_{th,b}}^{\varphi[a]_b} \frac{K_{Ic,b} - K_{\max}}{\Delta K^{n_b}} da}, \quad (4)$$

где нижний индекс « m » соответствует модернизированному варианту, « b » - исходному.

Расчет по зависимости (4) показал, что применительно к конкретному рассмотренному варианту повышения ресурса проушин узла крепления силового гидроцилиндра к металлоконструкции колонны грузоподъемной стрелы крано-манипуляторной установки мобильной энергетической машины АСТ-4-А для сварки магистральных трубопроводов эффективность предложенного способа выражается значением коэффициентом повышения ресурса проушины $\xi = 1,47$.

Выводы.

1. Как показал проведенный анализ, предложенный в [5] способ повышения трещиностойкости и живучести проушин узлов шарнирного соединения секций грузоподъемных стрел гидравлических крано-манипуляторных установок с силовыми гидроцилиндрами оказывается достаточно эффективным с точки зрения повышения ресурса указанных элементов.

2. Эффективность предложенного способа во многом определяется следующими факторами:

- исходной толщиной проушин, которая определяет степень соответствия условий распространения усталостных трещин условиям плоской деформации или плоского напряженного состояния;

- взаимным соотношением механических свойств материалов проушины и наплавки: их усталостных характеристик и показателей трещиностойкости.

3. Целесообразный выбор марки наплавляемого материала позволяет управлять величиной коэффициентом повышения ресурса проушины ξ .

Список литературы.

1. Манипулятор (грузоподъемное устройство) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [ru.wikipedia.org/wiki/Манипулятор_\(грузоподъемное_устройство\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Манипулятор_(грузоподъемное_устройство)).

2. Емтыль, З.К. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование / З.К. Емтыль, И.М. Бартенев, М.В. Драпалюк, П.И. Попиков, А.П. Татаренко, Л.Д. Бухтояров. – М.: ФЛИНТА: Наука, 2011. – 408 с.
3. Лагерев, И.А. Динамика трехзвенных гидравлических кранов-манипуляторов / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2012. – 196 с.
4. Лагерев, А.В. Оптимизация конструкции крана-манипулятора машины для сварки магистральных трубопроводов при модернизации / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Подъемно-транспортное дело. – 2013. - № 1 (71). – С. 4-7.
5. Патент 153946 Российская Федерация В66С 23/44. Трехзвенный гидравлический кран-манипулятор / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев. – Заявл. 10.12.14, № 2014149984. Опубл. 10.08.15. – Бюл. № 22.
6. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Патент RU № 153946 на полезную модель «Трехзвенный гидравлический кран-манипулятор» / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. - № 1. – С. 79-80.
7. Ярема, С.Я. Исследование роста усталостных трещин и кинематические диаграммы усталостного разрушения / С.Я. Ярема // Физико-химическая механика материалов. – 1977. - № 4.
8. Коцаньда, С. Усталостное разрушение металлов / С. Коцаньда. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
9. Трощенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справ. Т. 1. / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 505 с.
10. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.
11. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия. – Введ. 1991-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1991. – 23 с.
12. Лагерев, А.В. Прогнозирование ресурса типовых конструктивных элементов наземных транспортно-технологических средств при усталостных отказах / А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2012. – 48 с.

Сведения об авторе

Лагерев Игорь Александрович - кандидат технических наук, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», lagerev-bgu@yandex.ru.

INCREASING THE CRACKING RESISTANCE AND THE SURVIVABILITY OF THE ELEMENTS THE JOINTS OF THE SECTIONS OF THE JIB CRANE-MANIPULATING INSTALLATIONS OF MOBILE MACHINES

I.A.Lagerev

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

The new constructive method of increasing the cracking resistance and survivability of eyes swivel boom crane with hydraulic cylinders. Analysis of its efficiency on the basis of predicting the growth of fatigue cracks for the conventional and modified variants of the constructive execution of the connection nodes of the cylinders with the boom sections. This research was supported by the grant no. МК-92.2014.8 of the President of Russian Federation for young scientist support.

Keywords: crane-manipulator installation, crack resistance, survivability, plane stress, plane strain, the rate of crack growth, the stress intensity factor, eye

References

1. *Manipulator (gruzopodemnoe ustroystvo)* [Manipulator (he lifting device)]. Available at: [ru.wikipedia.org/wiki/Манипулятор_\(грузоподъёмное_устройство\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Манипулятор_(грузоподъёмное_устройство)).
2. Emtyl Z.K., Bartenev I.V., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Tatarenko A.P., Bukhtoyarov L.D. *Gidromanipulyatory i lesnoe tekhnologicheskoe oborudovanie* [Hydraulic manipulators and forestry process equipment]. Moscow, FLINTA, 2011. 408 p.
3. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Dinamika tryekhzvennykh gidravlicheskiy kranov-manipulatorov* [Dynamics three-tier hydraulic crane-manipulators]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2012. 196 p.
4. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Trunk pipeline welding machine crane-manipulator optimization during its modernization, *Podyemno-transportnoe delo*, 2013, No.1(71), pp. 4-7.
5. Patent RU 153946. *Tryekhzvennyy gidravlicheskiy kran-manipulator* [The three-tier hidraulic crane-manipulator]. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Declared 10.12.2014. Published 10.08.2014. Bulletin No. 22.
6. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Patent RU 153946. The three-tier hidraulic crane-manipulator, *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No.1, pp. 79-80.
7. Yarema S.Ya. Study of the growth of fatigue cracks and kinematic diagrams of fatigue failure, *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, 1977, No. 4.
8. Kocanda S. *Zmeceniovie niszczenie metali*. Warszawa, Wydawnictwa naukowo-techniczne, 1972.
9. Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* [Fatigue resistance of metals and alloys]. Kiev, Naukova dumka, 1987, Vol. 1. 505 p.
10. Broek D. *Elementary engineering fracture mechanics*. Leyden, Noordhoff International Publishing, 1974.
11. *GOST 19281-89. Prokat iz stali povyshennoy prochnosti. Obshchie tekhnicheskie usloviya*. [GOST 19281-89. Rolled steel with increased strength. General specifications]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1991. 23 p.
12. Lagerev A.V. *Prognozirovanie resursa tipovykh konstruktivnykh elementov nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv pri ustalostnykh otkazakh* [The resource forecasting of typical structural elements of ground transport-technological machines under fatigue failures]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2012. 48 p.

Author' information

Igor A. Lagerev - Candidate of Technical Sciences, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, lagerev-bgu@yandex.ru.