

УДК 614.846.63

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ УГЛОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЦИСТЕРН ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

В. А. КОВТУН, С. Г. КОРОТКЕВИЧ

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС Беларуси»,
г. Минск

И. А. БАРАН

Научно-технический центр комбайностроения
ОАО «Гомсельмаш», Республика Беларусь

Представлена методика расчета на прочность угловых сварных соединений цистерн прямоугольного сечения при возникающих в процессе эксплуатации переменных напряжениях. Проведен расчет на прочность углового сварного соединения передней и боковой стенок, а также углового сварного соединения передней стенки и дна серийной и модернизированной цистерн пожарных автомобилей. В основу расчета положены экспериментальные данные возникающих механических напряжений в конструкциях цистерн пожарных автомобилей, полученные в ходе тензометрических исследований при эксплуатации.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, цистерна, механические напряжения, запас прочности, модернизация, угловое сварное соединение.

CALCULATION FOR ANGULAR WELDED STRENGTH FIREFIGHTER TANK CONNECTIONS MOTOR VEHICLES UNDER VARIABLE VOLTAGES

V. A. KOVTUN, S. G. KOROTKEVICH

State Educational Institution “University of Civil Protection
of the Ministry of Emergencies of Belarus”, Minsk

I. A. BARAN

Scientific and Technical Center of Combine Engineering
OJSC “Gomselmash”, the Republic of Belarus

The article presents a method of calculation for strength of angular welded joints of tanks of rectangular cross section at variable stresses arising during operation. The methodology takes into account calculation of the strength of the angular welded joint of the front and side walls, as well as the angular welded joint of the front wall and the bottom of the serial and modernized fire truck tanks. The calculation is based on experimental data of arising mechanical stresses in the structures of tanks of fire vehicles, obtained during tensometric studies during operation.

Keywords: fire truck, tank, mechanical stresses, safety margin, modernization, angular welded joint.

Введение

К одним из основных транспортных средств специального назначения в системе МЧС относятся пожарные автоцистерны. При производстве цистерн современных пожарных автомобилей (ПА) форма прямоугольного сечения получила наибольшее распространение. Это обусловлено тем, что применение таких цистерн позволяет более полно использовать ширину шасси, способствует снижению центра массы ав-

томобиля и обеспечивает оптимальное расположение большого количества перевозимого аварийно-спасательного оборудования [1].

Ежедневная эксплуатация ПА связана с необходимостью оперативного движения в режимах «ускорение», «торможение», «поворот» к месту возникновения чрезвычайных ситуаций. В Республике Беларусь ежегодно большая часть всех пожаров происходит в сельской местности и природных экосистемах. В результате пожарные автоцистерны вынуждены осуществлять оперативное движение по проселочным дорогам и в условиях бездорожья. При этом стенки цистерн ПА испытывают большие повторно-переменные нагрузки, передаваемые через раму шасси при движении автомобиля и зависящие от характера рельефа местности, а также от воздействия транспортируемой жидкости [2]. Указанные эксплуатационные факторы оказывают существенное влияние на возникновение переменных напряжений в элементах цистерн и образование усталостных трещин в областях сварных соединений конструкции, что требует выработки научно обоснованных решений для модернизации. В результате обследований и проведения ремонтных работ установлено, что основными местами, подверженными появлению течи цистерн, являются угловые сварные соединения их стенок.

Исследования проводились для наиболее распространенных на территории Республики Беларусь и уже вышедших из гарантийного периода обслуживания пожарных аварийно-спасательных автомобилей с объемом цистерны 5 м^3 на шасси МАЗ-5337. Конструкция цистерн данных автомобилей выполнена из нержавеющей стали марки AISI 430 2В и представляет собой емкость прямоугольного сечения, образованную передней, задней, боковыми стенками, дном и крышей. Внутри емкости расположены ребра жесткости, продольные и поперечные волноломы. В результате проведенного комплекса исследований разработаны рекомендации по модернизации серийных цистерн ПА, включающие установку дополнительных усиливающих конструкцию элементов [3]–[5]. Экспериментальное подтверждение эффективности разработанных методик и рекомендаций, обеспечивающих снижение напряженного состояния цистерн ПА в процессе эксплуатации, проведено с помощью измерительного тензометрического комплекса. Путем применения измерительных тензорозеток, устанавливаемых в областях угловых сварных соединений, исследованы возникающие механические напряжения в конструкциях серийной и модернизированной цистерны объемом 5 м^3 ПА на шасси МАЗ-5337 [6].

Таким образом, целью работы является расчет прочности угловых сварных соединений цистерн ПА при возникающих в процессе движения переменных напряжениях.

Методика расчета

Запас прочности по пределу выносливости n_τ при переменных напряжениях в расчете угловых сварных соединений определяется по формуле [7]:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1} - \psi_\sigma \tau_m}{\tau_a K_\sigma}, \quad (1)$$

где τ_{-1} – предел выносливости, МПа; τ_a , τ_m – амплитуда и среднее напряжение цикла при действии касательных напряжений, МПа; K_σ – коэффициент, учитывающий совместное влияние концентрации напряжений, качества обработки поверхности и размеров детали (принимается равным 2, 3, как для углового сварного шва, выполненного ручной сваркой) [8]; ψ_σ – коэффициент, учитывающий влияние асимметрии цикла на предел выносливости.

Наряду с коэффициентом запаса прочности по переменным напряжениям должен быть определен коэффициент запаса прочности по пределу текучести n_σ при переменных напряжениях [9]:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_T}{\sigma_a + \sigma_m}, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести, МПа (для стали марки AISI 430 2В $\sigma_T = 205$ МПа [10]); σ_a , σ_m – амплитуда и среднее напряжение цикла, МПа.

На практике определяют оба коэффициента n_t и n_σ , при этом наименьшее значение принимается за фактический коэффициент запаса прочности [8].

Расчет на действие осевого усилия относительно соединяемых стенок цистерны проводится с учетом того, что напряжения распределяются по длине шва равномерно. В случае прямого шва прочность проверяется по формуле как при растяжении, которая записывается в виде [11]:

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{шва}}} \leq [\sigma], \quad (3)$$

где σ – действующее напряжение, МПа; $[\sigma]$ – предельное напряжение, МПа; $A_{\text{шва}}$ – площадь разрушения сварного шва (разрыв), мм²; F – действующая сила, Н.

При расчетах сварных швов наплывы не учитываются, а принимается, что в разрезе угловой шов имеет форму прямоугольного равнобедренного треугольника и разрушение шва происходит по его минимальному сечению ab (рис. 1). При этом площадь разрушения можно определить по формуле [11]:

$$A_{\text{шва}} = kl_w \sin(45^\circ), \quad (4)$$

где l_w – длина сварного шва, мм; k – катет сварного шва (принимается по его минимальному размеру равным 2,5 мм для угловых сварных соединений стенок цистерны и 2,8 мм для угловых сварных соединений стенок и дна), мм.

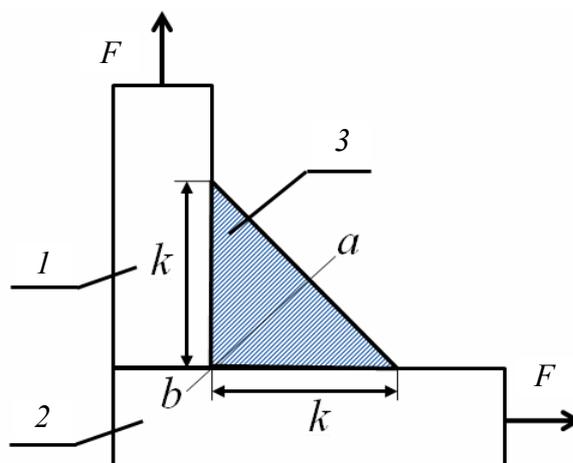


Рис. 1. Расчетная схема углового сварного соединения передней и боковой стенок цистерны пожарного автомобиля:
1 – боковая стенка; 2 – передняя стенка; 3 – сварной шов

В процессе эксплуатации угловые сварные соединения испытывают деформацию сдвига. Под сдвигом понимают деформацию, представляющую собой искажение первоначально прямого угла малого элемента бруса под действием касательных напряжений τ . Развитие этой деформации приводит к разрушению, называемому срезом. В угловых сварных соединениях все внешние нагрузки приводятся к центру масс сварного шва. Кроме того, при определении напряжений сам угловой шов рассматривается как менее прочный, чем основной металл. При этом используется принцип независимости действия сил с последующим суммированием напряжений от каждого силового воздействия с учетом взаимного нахождения возникающих напряжений в шве [11]. На основании вышеизложенного при возникающих касательных напряжениях от действия силы F условие прочности на срез можно записать следующим образом:

$$\tau_c = \frac{F}{A_{\text{шва}}} = \frac{F}{\sin(45^\circ)kl_w} \approx \frac{F}{0,7kl_w} \leq [\tau_c], \quad (5)$$

где $[\tau_c]$ – допускаемое напряжение на срез, МПа.

В соответствии с СП 16-13330–2011 [8] расчет сварного соединения с угловыми швами при действии силы F , проходящей через центр тяжести соединения, выполняется на срез (условный). При этом необходимо осуществить проверку условия:

$$\frac{\beta_f R_{wf}}{\beta_z R_{wz}} \leq 1. \quad (6)$$

При выполнении условия (6) расчет проводится по металлу шва по формуле (7); если полученное значение больше 1, то по металлу границы сплавления по формуле (8):

$$\frac{F}{\beta_f kl_w R_{wf} \gamma_c} \leq 1; \quad (7)$$

$$\frac{F}{\beta_z kl_w R_{wz} \gamma_c} \leq 1, \quad (8)$$

где l_w – расчетная длина швов в сварном соединении, равная суммарной длине всех его участков за вычетом по 1 см на каждом непрерывном участке шва (принимается равным 1190 мм для угловых сварных соединений стенок цистерны ПА и 2190 мм для угловых сварных соединений передней, задней стенок и дна), мм; β_f и β_z – коэффициенты, зависящие от технологии сварки и катета шва (принимается 0,7 и 1 соответственно с учетом того, что работы выполнялись ручной полуавтоматической сваркой с проволокой сплошного сечения $d < 1,4$ мм) [8]; R_{wz} – расчетное сопротивление углового шва, МПа (принимается равным 215 МПа) [8]; R_{wz} – нормативное сопротивление проката ($R_{wz} = 0,45\sigma_b$, принимаем равным 207 МПа) [10], МПа; γ_c – коэффициент условий работы (принимается равным 1,0).

В дальнейшем выбирается менее прочное сечение и, зная длину сварного шва и его катет, в соответствии с формулами (7) и (8) определяется предельно допустимое значение силы F . Далее по формуле (5) определяется допускаемое напряжение на

срез для углового сварного соединения, которое принимается в качестве предела выносливости. Для определения амплитуды τ_a и среднего напряжения цикла τ_m применено компьютерное моделирование ввиду отсутствия возможности их экспериментальной оценки.

Результаты расчета и их обсуждение

Проведен сравнительный расчет запаса прочности по переменным напряжениям серийной и модернизированной цистерны объемом 5 м³ ПА на шасси МА3-5337.

Выполним проверку условия (6):

$$\frac{0,7 \cdot 215}{1 \cdot 207} < 1.$$

Так как условие выполняется, то дальнейший расчет проводится по металлу шва по формуле (7).

Определим предельное значение действия силы F на сварной шов по его металлу соответственно для углового сварного соединения стенок и углового сварного соединения передней стенки и дна цистерны:

$$F = \beta_f k_f l_w R_{wf} \gamma_c = 0,7 \cdot 2,5 \cdot 1190 \cdot 215 \cdot 1 = 0,448 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F = \beta_f k_f l_w R_{wf} \gamma_c = 0,7 \cdot 2,8 \cdot 2190 \cdot 215 \cdot 1 = 0,923 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

По формуле (5) определим допускаемое напряжение на срез для угловых сварных соединений стенок и углового сварного соединения передней стенки и дна цистерны через предельное значение действия силы F :

$$[\tau_c] = \frac{0,448 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 2,5 \cdot 1190} = 215 \text{ МПа}; \quad [\tau_c] = \frac{0,923 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 2,8 \cdot 2190} = 215 \text{ МПа}.$$

Коэффициент, учитывающий влияние асимметрии цикла на предел выносливости, определим по формуле [9]:

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (9)$$

где σ_0 – экспериментальные данные, получаемые из диаграммы предельных амплитуд, МПа.

Ввиду отсутствия экспериментальных данных для σ_{-1} и σ_0 для применяемой в конструкции цистерны стали значение коэффициента ψ_σ вычислим по следующей эмпирической формуле [9], [12]:

$$\psi_\sigma = 0,02 + 0,0002\sigma_b = 0,02 + 0,0002 \cdot 460 = 0,112, \quad (10)$$

где σ_b – предел прочности, МПа (для стали марки AISI 430 2В $\sigma_b = 460$ МПа [10]).

Амплитуда напряжения цикла τ_a и среднее напряжение цикла τ_m определялись при помощи компьютерного моделирования. Для оценки возникающих механических напряжений в программном комплексе ANSYS разработаны конечно-элементные модели исследуемых конструкций цистерн, которые адаптированы к эксплуатационным режимам [2], [3]. Сравнительный анализ показал, что расхожде-

ние полученных значений методом компьютерного моделирования по установлению максимальных нормальных напряжений, возникающих в угловых сварных соединениях серийной цистерны ПА [6], по сравнению с данными натурных испытаний не превышает 4–5 %. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что полученные в ходе моделирования максимальные значения напряжения сдвига для угловых сварных соединений цистерн соответствуют аналогичным возникающим напряжениям в процессе эксплуатации (рис. 2).

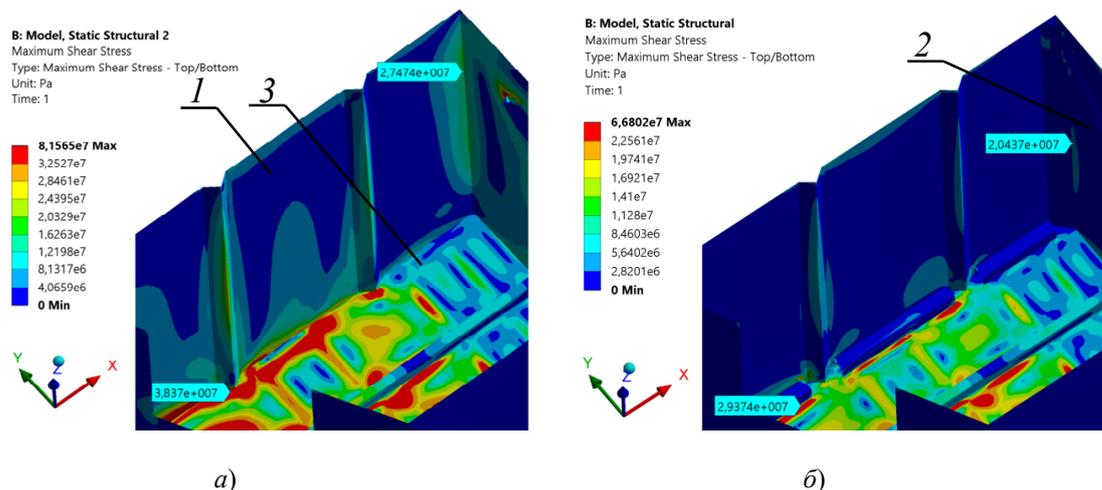


Рис. 2. Фрагменты 3D-моделей распределения полей напряжений сдвига для угловых сварных соединений серийной (а) и модернизированной (б) цистерны ПА при моделировании наиболее нагруженного режима движения ПА (вид изнутри угловых сварных соединений передней, боковой стенок и дна): 1 – передняя стенка; 2 – боковая стенка; 3 – дно

В табл. 1 представлены максимальные значения напряжения сдвига τ_a и τ_{a^*} для угловых сварных соединений цистерн ПА и среднее напряжение сдвига τ_m . При этом значения τ_{a^*} получены при моделировании статического нагружения цистерны ПА транспортируемой жидкостью, а τ_a – при моделировании наиболее нагруженного режима движения ПА.

Таблица 1

Значения напряжения сдвига для угловых сварных соединений цистерн пожарных автомобилей, полученные в результате компьютерного моделирования

Тип конструкций цистерн ПА	Области сварных соединений	τ_{a^*} , МПа	τ_a , МПа	τ_m , МПа
Серийная	Угловое соединение передней и боковой стенок	10–12	24–27	19,5
	Угловое соединение передней стенки и дна	14–17	33–38	27,5
Модернизированная	Угловое соединение передней и боковой стенок	5–7	19–20	13,5
	Угловое соединение передней стенки и дна	10–11	24–29	20

Амплитуду напряжений цикла σ_a определим по формуле [9], [13]:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \quad (11)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение цикла, МПа; σ_{\min} – минимальное напряжение цикла, МПа.

Среднее напряжение цикла σ_m определим по формуле

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}. \quad (12)$$

В соответствии с экспериментальными данными, полученными в ходе тензометрических испытаний [6], в табл. 2 представлены значения максимальных и минимальных напряжений цикла, а также значения амплитуды напряжений цикла и среднего напряжения цикла, полученные по формулам (11) и (12).

Таблица 2

Параметры, характеризующие цикл напряжений при тензометрических испытаниях цистерн пожарных автомобилей

Тип конструкций цистерн ПА	Области сварных соединений	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	σ_a , МПа	σ_m , МПа
Серийная	Угловое соединение передней и боковой стенок	96	-158	127	-46,5
	Угловое соединение передней стенки и дна	80	-173	125,5	-47,5
Модернизированная	Угловое соединение передней и боковой стенок	62	-108	85	-23
	Угловое соединение передней стенки и дна	47	-149	98	-51

Проведем расчет коэффициентов запаса прочности по пределу выносливости при переменных напряжениях соответственно для углового сварного соединения стенок и углового сварного соединения передней стенки и дна серийной цистерны:

$$n_\tau = \frac{215 - 0,112 \cdot 27}{19,5 \cdot 2,3} = 3,43; \quad n_\tau = \frac{215 - 0,112 \cdot 38}{27,5 \cdot 2,3} = 2,42.$$

Проведем расчет коэффициентов запаса прочности по пределу выносливости при переменных напряжениях соответственно для углового сварного соединения стенок и углового сварного соединения передней стенки и дна модернизированной цистерны:

$$n_\tau = \frac{215 - 0,112 \cdot 20}{13,5 \cdot 2,3} = 4,64; \quad n_\tau = \frac{215 - 0,112 \cdot 29}{20 \cdot 2,3} = 3,19.$$

Проведем расчет коэффициентов запаса прочности по пределу текучести при переменных напряжениях соответственно для углового сварного соединения стенок и углового сварного соединения передней стенки и дна серийной цистерны:

$$n_{\sigma} = \frac{205}{127 + 46,5} = 1,18; \quad n_{\sigma} = \frac{205}{125,5 + 47,5} = 1,19.$$

Проведем расчет коэффициентов запаса прочности по пределу текучести при переменных напряжениях соответственно для углового сварного соединения стенок и углового сварного соединения передней стенки и дна модернизированной цистерны:

$$n_{\sigma} = \frac{205}{85 + 23} = 1,9; \quad n_{\sigma} = \frac{205}{98 + 51} = 1,38.$$

В табл. 3 представлены полученные значения коэффициентов запаса прочности при переменных напряжениях.

Таблица 3

Расчетные значения коэффициентов запаса прочности

Тип конструкций цистерны ПА	Области сварных соединений	Расчетные коэффициенты запаса прочности	
		n_{τ}	n_{σ}
Серийная	Угловое соединение передней и боковой стенок	3,43	1,18
	Угловое соединение передней стенки и дна	2,42	1,19
Модернизированная	Угловое соединение передней и боковой стенок	4,64	1,9
	Угловое соединение передней стенки и дна	3,19	1,38

Сравнительный анализ результатов прочностных расчетов конструкций цистерн ПА при возникающих в процессе движения переменных напряжениях позволил установить достаточно низкий запас прочности по пределу текучести для серийной конструкции в областях угловых сварных соединений $n_{\sigma} = 1,18-1,19$, в то время как запас прочности по пределу выносливости составил $n_{\tau} = 2,42-3,43$. При этом результаты расчета модернизированной цистерны показали значительное повышение запаса прочности по пределу текучести в областях угловых сварных соединений $n_{\sigma} = 1,38-1,9$, а значения запаса прочности по пределу выносливости составили $n_{\tau} = 3,19-4,64$.

Заключение

Расчет на прочность угловых сварных соединений цистерн при возникающих переменных напряжениях позволил оценить степень воздействия повторно-переменных нагрузок на элементы цистерны в процессе эксплуатации пожарных автомобилей. Установлено, что модернизация цистерн путем установки дополнительных усиливающих конструкцию элементов обеспечивает снижение возникающих механических напряжений в областях угловых сварных соединений передней и боковой стенок на 31–32 %, а также передней стенки и дна на 13–14 %.

Результаты исследований серийной и модернизированной цистерн объемом 5 м³ ПА на шасси МАЗ-5337, проведенные в соответствии с данной методикой, показали,

что модернизированные цистерны ПА обладают повышенным в 1,2–1,6 раза запасом прочности. Это позволило снизить количество ремонтов цистерн по причине усталостных повреждений ее сварных соединений.

Полученные результаты подтвердили эффективность модернизации цистерн ПА на шасси МАЗ-5337, что позволило рекомендовать разработку к внедрению в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Литература

1. Воронков, О. Ю. Пожарная техника : учеб. пособие : в 2 ч. / О. Ю. Воронков, С. Ф. Храпский ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : ОмГТУ, 2014. – Ч. 1. – 96 с.
2. Ковтун, В. А. Компьютерное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния конструкций цистерн пожарных автомобилей / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. А. Жаранов // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2018. – № 1. – Т. 2. – С. 81–90 (in Rus.). – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.81.
3. Оптимизация конструкции цистерны пожарного автомобиля АЦ-5.0-50/4 на базе шасси МАЗ-5337 методом компьютерного моделирования / В. А. Ковтун [и др.] // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2019. – № 1. – Т. 3. – С. 38–45.
4. Пожарная цистерна : полез. модель ВУ 11787 / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич, В. Н. Пасовец. – Опубл. 30.10.2018.
5. Цистерна пожарного автомобиля : полез. модель ВУ 12486 / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич. – Опубл. 28.02.2021.
6. Kovtun, V. Damage features of tanks of fire trucks and strength assessment of their welded joints / V. Kovtun, S. Korotkevich, Y. Pleskachevsky // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. – 2021. – № 1 (54). – P. 15–20. – DOI: 10.46864/1995-0470-2020-1-54-15-20.
7. Иосилевич, Г. Б. Детали машин : учеб. для студентов машиностроит. специальностей вузов / Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
8. СП 16-13330–2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М., 2011. – Режим доступа: <https://dwg.ru/dnl/13659>. – Дата доступа: 22.12.2020.
9. Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов : учебник / М. Д. Подскребко. – Минск : Выш. шк., 2007. – 797 с.
10. AISI 430 сталь нержавеющей – характеристики. – 2021. – Режим доступа: https://emk24.ru/wiki/astm_steels/stal_aisi_430_1324810/. – Дата доступа: 24.05.2021.
11. Скойбеда, А. Т. Детали машин. Теория и расчет : учеб.-метод. пособие / А. Т. Скойбеда, В. А. Агейчик, И. Н. Кононович. – Минск : БГАТУ, 2014. – 372 с.
12. Гоц, А. Н. Определение коэффициентов влияния асимметрии цикла напряжений при расчете деталей машин на выносливость / А. Н. Гоц // Фундам. исслед. – 2015. – № 8. – Ч. 1. – С. 60–63.
13. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости = Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behaviour calculation. – Введ. 01.07.83 Постановлением Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР. – М., 1982. – 132 с.