

ЛИТЕРАТУРА

1. ZIENKIEWICZ, O. C. and TAYLOR, R. L. (2000) The finite element method. Butterworth-Heinemann, vol. 1: Basis. Oxford.
2. Bergonzoni, F. (1989). Le Torri di Bologna: quando e perché sorsero, come vennero costruite, quante furono, chi le innalzò, come scomparvero, quali esistono ancora. Casalecchio di Reno: Grafis.
3. Natalia E. Lozano-Ramírez. Finite element modeling of existing masonry towers: The Asinelli tower. Thesis for: Dottore magistrale in Architettura costruzione città. Advisor: Stefano Invernizzi. POLITECNICO DI TORINO. Faculty of Architecture. Turin, Italy. 2015
4. Stefano Invernizzi, Giuseppe Lacidogna, Natalia E. Lozano-Ramírez, Alberto Carpinteri. Structural monitoring and assessment of an ancient masonry tower. Engineering Fracture Mechanics, 2019, vol. 210, pp. 429–443, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.011>
5. Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pela', L. (2010). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced Approaches. Archives of Computational Methods in Engineering, 17(3), 299–325. <http://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
6. Palermo, M., Silvestri, S., Gasparini, G., Baraccani, S., & Trombetti, T. (2015). An approach for the mechanical characterisation of the Asinelli Tower (Bologna) in presence of insufficient experimental data. Journal of Cultural Heritage. <http://doi.org/10.1016/j.culher.2014.05.002>
7. Stanislau Dounar, Alexandre Iakimovitch, Katsiaryna Mishchanka, Andrzej Jakubowski, and Leszek Chybowski. (2020) FEA Simulation of the Biomechanical Structure Overload in the University Campus Planting. Applied Bionics and Biomechanics, Volume 2020, Article ID 8845385. <https://doi.org/10.1155/2020/8845385>
8. Dounar, S., Iakimovitch, A. & Jakubowski, A. (2021) Finite element analysis of the dynamically created portal in the huge machine tool of “travelling column” type. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2021, 65 (137) <https://repository.am.szczecin.pl/handle/123456789/2658>, <https://doi.org/10.17402/458>

Поступила 18.05.2022

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С. С.¹, Якимович А. М.¹, Яцкевич О. К.¹, Федорец А. В.², Резник С. В.³

МКЭ-АУДИТ НАГРУЖЕНИЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ТЯЖЕЛОГО ПЕЛЛЕТНОГО ПРЕСС-АВТОМАТА

1. Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

2. ОАО «МЗОР»,

Минск, Беларусь

3. ОАО «СТАНКОГОМЕЛЬ»,

Гомель, Беларусь

Проведен упруго-пластический МКЭ-анализ пресса для компактирования крупных пеллет. Смоделированы ситуации от номинального нагружения (1,6 МН) до 10-кратной перегрузки. Рассмотрены литой и сварной варианты исполнения корпуса и коленвала.

Выявлена сбалансированность несущей системы. Отсутствуют крупные концентраторы напряжений. Самой податливой деталью является коленвал. В упругой области пресс выдерживает 3-кратную перегрузку. При большем распоре на буртиках коленвала ожидается локальное автофретирование. Пресс способен перенести 6-кратную перегрузку. При более сильном распоре оголовка шатуна выступает в роли предохраняющего пластического шарнира.

Обсуждены эффекты много- и малоциклового усталости. Рекомендуются кольцевое упрочнение буртиков коленвала и редизайн оголовка шатуна.

Сокращения и обозначения:

КПМ – кривошипно-ползунный механизм, в котором кривошип (коленвал) и шатун приводят ползун (крейцкопф),двигающийся по направляющим;

ПГ – прессовая головка, внутри которой пуансон компактирует пеллеты;

ПуР – пиковый распор. Это появление пары противоположных сил между пуансоном и *ПГ*. В норме распор (1,6 МН номинально – *ПуР-1*) возникает между пуансоном и сжимаемой пеллетой в в. м. т. *КПМ*. В канале прессования возможно столкновение пуансона с препятствием. Рассмотрены ситуации вплоть до 10-кратного возрастания сил распора – *ПуР-10* (16 МН);

ОПД – очаг пластических деформаций – локальный концентратор напряжений на детали (например, галтель буртика коленвала), в котором местное пластическое течение начинается гораздо раньше, чем в детали в целом. На ОПД проявляет себя эффект автофретирования (самоскрепления);

ИНС – историческая несущая система (несущая система – *НС* – машины или сооружения, созданная до появления МКЭ-анализа и выдержавшая многочисленные циклические и пиковые нагрузки). Пресс-автомат относится к *ИНС*;

СИБ, *НИВ* – старый и новый исторические варианты пресс-автомата. Чертежи *СИБ* выпущены в 1962 г. *НИВ* относится к началу XXI-го века;

в. м. т., *н. м. т.* – верхняя и нижняя мертвые точки кривошипного механизма;

н. д. с. – напряженно-деформированное состояние.

Область исследования. Работа относится к тяжелому машиностроению и касается проектирования, реновации и производства крупногабаритных пеллетных прессов. Они важны для топливной безопасности страны и экспорта твердых энергетических продуктов. Пресс-автомат (рис. 1) в непрерывном режиме штампует с помощью сдвоенного КПМ топливные пеллеты из органической сыпучей смеси (торф, опилки, солома и т. п. – до 80 млн. пеллет $180 \times 80 \times 50$ мм в год). В случае работы на богатом торфяном месторождении пара прессов может справиться с круглогодичным обеспечением пеллетами (брикетами) жителей административного района.

Рассматриваемый пресс-автомат является редким примером долговечной, непрерывно работающей машины. Несущая система (*НС*) выдерживает исключительно большое число циклов нагрузок (до 40 млн/год от каждого КПМ). Пресса в исходной виде (*СИБ*) были поставлены в Республику Беларусь 50–60 лет назад.

Реновация конструкции (*НИВ*) и производство некоторого числа машин была выполнена 15 лет назад на ОАО «МЗОР». Пресса *СИБ* и, даже, *НИВ* можно уже назвать историческими машинами. Они требовали только текущего ремонта, связанного обычно с износом. Несущие системы *ИНС* работали надежно. Поэтому их разумно исследовать.

Для изучения *ИНС* пресса-автомата в данной работе проведены виртуальные испытания методом конечных элементов (МКЭ) [1]. Исследование является своего рода МКЭ-аудитом исторической (*legacy*), оправдавшей себя (*approved*) машины. Это важно для следующей реновации и расширения гаммы пеллетных прессов.

Конструктивные черты модели. Несущая система *НС* пресса-автомата имеет габариты $5100 \times 1760 \times 1600$ мм (рис. 1 – показан один из двух противофазно работающих КПМ). Пеллета 1 сжимается пуансоном 2 в прессовой головке 3 из сыпучей смеси, подаваемой сверху (со стороны маркера 3 на рис. 1, а). Каждая новая пеллета проталкивается пуансоном влево, в стек пеллет. Стек движется в сужающемся канале и обжимается. Длину и клиновидность канала можно регулировать.

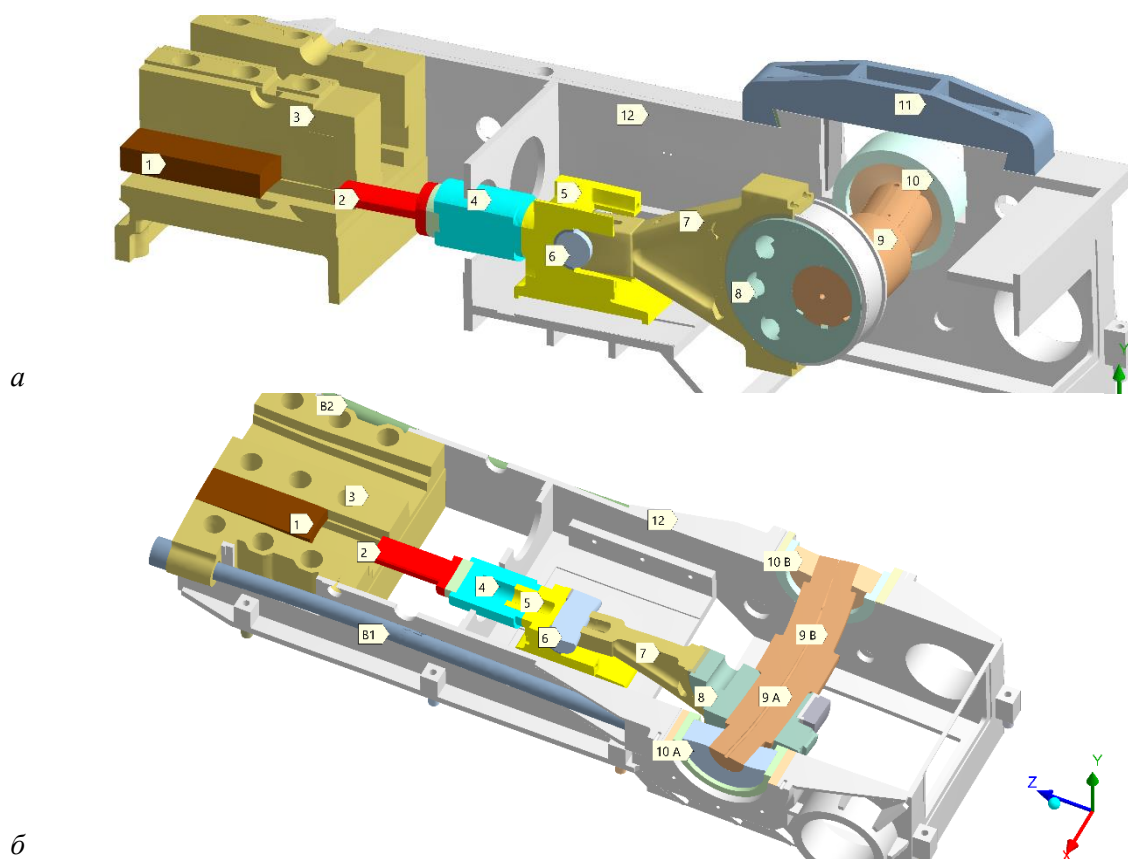


Рис. 1. Несущая система пресс-автомата в вертикальном (а) и горизонтальном (б) сечениях (в. м. т.; масштаб деформационных перемещений $\times 100$: ПиР-5)

Пуансон 2 движется возвратно-поступательно вместе со плунжером 4 и ползуном 5 (крейцкопфом), которые имеют свои направляющие. Ось 6 соединяет ползун с оголовком шатуна 7. Шатун приводится эксцентриком 8, неподвижно закрепленном на вращающемся коленвале 9. Коленвал удерживается в подшипниках 10. Подшипниковые узлы зафиксированы скобами 11 в корпусе 12.

Между стеком пеллет и пуансоном возникает распорное усилие, максимальное при прохождении КПМ своей в. м. т. На рис. 1 несущая система нагружена парными силами (согласно рис. 2, а) и продеформирована. Заметен (рис. 1, б) прогиб коленвала между подшипниками 10А и 10В. Шейки 9А, 9В предназначены для противофазных КПМ.

Корпус 12 пресса может быть предварительно стянут в продольном направлении тросами (шпильками) В1 и В2 (по две с каждой стороны). Номинальное натяжение в каждой из четырех тяг – 400 кН. Расчетное усилие прессования составляет 1,6 МН (*ПиР-1*). Это как раз соответствует предварительному натяжению тяг.

На рис. 2, а показан собственно кривошипно-ползунный механизм *КПМ*. Ползун движется в корпусе по направляющим А, В. Плунжер находится в идеализированной направляющей С. Сила Е на пеллете и сила D на пуансоне равны по величине и противоположны по направлению. Они создают распор во всей НС пресса.

Кинематика пресса отражена на рис. 2, б. Двигатель приводит первичный вал I с маховиком Fw. Две пары зубчатых колес А, В редуцируют частоту вращения до $n_{crank} = 80 \text{ мин}^{-1}$ на кривошипе II (он же вторичный вал).

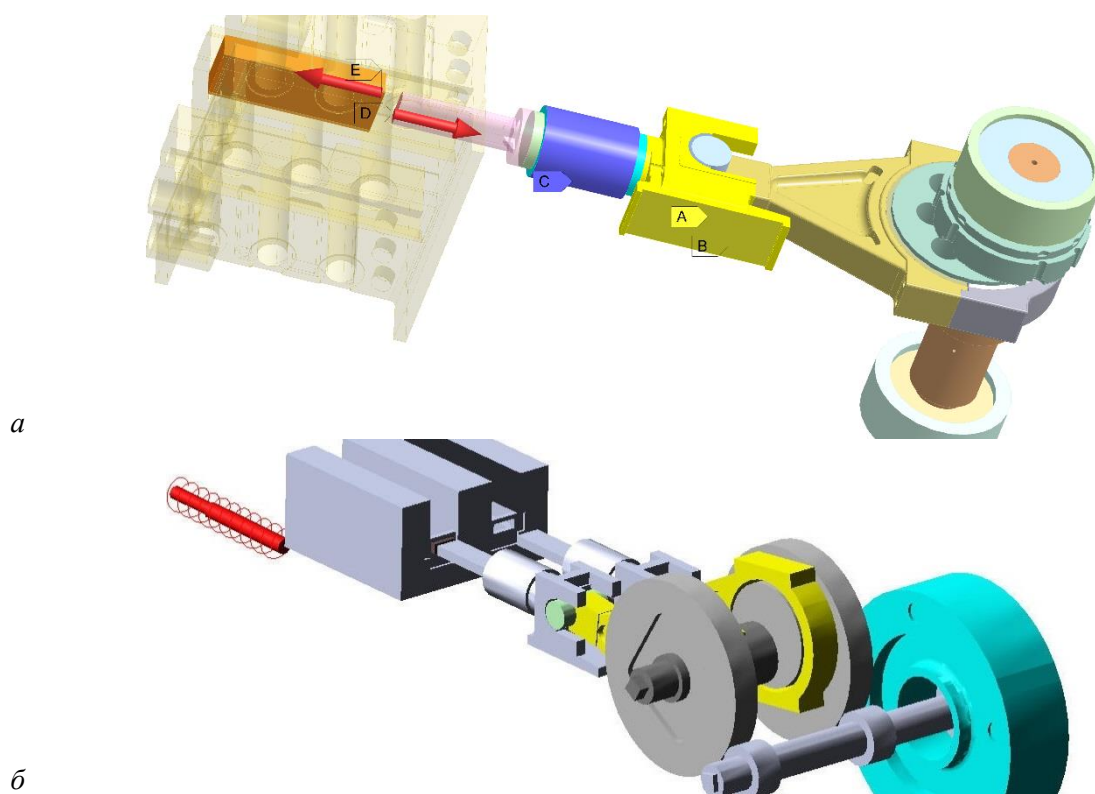


Рис. 2. Кривошипно-ползунный механизм КПМ (*а* – в. м. т.; А, В, С – направляющие ползуна и плунжера; D, E – парные распорные силы между пуансоном и pelletой $F_p^1 = -F_p^2$) и массово-кинематическая модель (*б*; [2]) привода КПМ

Маркер Р указывает на район прессования. Прессовой головке в массово-кинематической модели может быть приписана упругая поддержка пружиной S. В реальности роль пружины выполняет корпус пресса.

Корпус пресс-автомата выполнен из стали. В СИБ это литье (корпус и ПГ являются одной отливкой), в НИВ – сварная конструкция из проката. Шатун, ползун и ПГ получены литьем стали. Коленвал в СИБ сделан стальным литьем, а в НИВ – это стальной катанный пруток, собранный заодно со стальными эксцентриками.

Свойства ключевых деталей пресса отражены в табл. 1.

Таблица 1 – Массы и пределы текучести σ_t основных деталей НС пресса-автомата

Конструктивный вариант	Масса, кг			
	Корпус	Коленвал с эксцентриками	Ползун + плунжер	ПГ
СИБ	16926	3480	1012	–
НИВ	8882	1244 + (2 × 1086)	1012	5868
Предел текучести σ_m , МПа	300	440	300	–

Видно, что суммарная масса корпуса и ПГ снижена в НИВ (14750 кг) по сравнению с СИБ (16926 кг). Экономия веса составляет 13 % и достигнута за счет более тонких стенок сварного корпуса в НИВ. В СИБ крупногабаритная отливка корпуса по технологиям того времени должна была иметь стенки от 80 до 230 мм.

Пуансон весом 85 кг выполнен из инструментальной стали и закален. Масса шатуна в обоих вариантах – 588 кг. Его предел текучести принят равным 360 МПа.

Постановка исследования и цель работы. Данные по эксплуатации прессов-автоматов в вариантах *СИБ*, *НИВ*, собранные инженерами ОАО «МЗОР», указывают, что нагружение НС всегда является пиковым. Оно связано с прохождением в. м. т. и сжатием пеллеты в сужающемся канале. Поэтому номинальный режим обозначим, как *ПиР-1*. Ему приписано распорное усилие 1,6 МН. Циклограммы потребления электроэнергии прессами в производственных условиях указывают, что нагрузка на пуансон со стороны пеллеты обычно находится в диапазоне 40–90 % от номинала.

Спорадически пуансон пресса может упираться в неожиданное препятствие. Воздействие может быть эксцентричным (пуансон нажимает своей кромкой в ПГ на входе в нее). Это ведет к быстрой поломке пуансона (внецентренное сжатие) и не должно быть опасно для всей НС.

Худший случай – центральный упор в канале, когда кинетическая пресса должна быть погашена, в основном, в энергии упругого и пластического деформирования НС пресса. Именно это ведет к действительно высоким пиковым нагрузкам (в работе рассмотрены ситуации до *ПиР-10* – перегружение на порядок, до 16 МН).

Цель работы – выяснить и проанализировать н. д. с. пресса в двух группах ситуаций – в *номинальном режиме (ПиР-1)* и в *режиме перегрузки (от ПиР-2 до ПиР-10)*. Первый режим ассоциируется со многоциклового усталостью. Второй режим может вызвать малоцикловую усталость и даже немедленное трещинообразование в деталях.

Нужно оценить потенциал и возможные слабые места НС пресса для работы в обоих режимах. Требуется рекомендации по рациональному локальному усилению конструкции.

МКЭ-модель и модельные допущения. В данной работе моделирование производилось квазистатически в упруго-пластической постановке. Виртуальные испытания осуществлялись в системе ANSYS с учетом накопленного опыта моделирования различных несущих систем [3; 4].

Пресс-автомат выполнен из стальных деталей. Поэтому для них приняты модуль упругости $E = 200 \text{ ГПа}$ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Это структурно-независимые показатели сталей.

Кинематика КПМ в МКЭ-анализе не моделируется. Вращение коленвала не отображается. При нагружении механизма происходят только его деформационные перемещения в положении в. м. т. Рассматривается упруго-пластическая задача с билинейной моделью пластичности.

Ввиду относительной тихоходности пресса ($n_{crank} = 80 \text{ мин}^{-1}$) динамические эффекты не рассматриваются. Распорные силы прилагаются статически. Моделируется только один из двух КПМ.

Трение в направляющих и на шейках коленвала не учитывается. Предварительное моделирование [2] показало, что оно слабо влияет на картины напряжений пресса.

Сварные и стянутые болтами соединения моделируются как контактные пары со статусом *bonded*. Подвижные соединения представлены контактными парами со статусом *no separation*. Самоустанавливающиеся (сферические) подшипники коленвала представлены эластичными втулками из модельного материала.

Для стальных деталей в машиностроении при первых сильных нагружениях (*shakedown*) характерны небольшие локальные пластические деформации в концентраторах напряжений (ОПД) [5]. Для качественных сталей полагаем допустимой локальную пластическую деформацию до 0,4–0,5 % [6; 7]. В этом случае в ОПД формируются остаточные напряжения, противоположные рабочим. При последующих нагружениях такого же уровня пластического течения происходит. Этот эффект называется автофреттированием (самоскреплением) [6].

Более сильная пластическая деформация дает обратную деформацию при разгрузке. Деформация накапливается по ходу событий перегрузения. Запускается механизм опасной малоциклового усталости (*ratcheting*) [5; 6].

Упругий анализ н. д. с. прессы при номинальном нагружении. На рис. 3 представлены картины максимального главного напряжения σ_1 при номинальном нагружении прессы для вариантов СИВ (рис. 3, а) и НИВ (рис. 3, б). Напряжение σ_1 выявляет, прежде всего, очаги опасного растяжения.

Литой корпус оказался (рис. 3, а) весьма умеренно нагруженной деталью с растяжениями в стенках до 15–20 МПа. Только в месте перехода стенки в прессовую головку (36,638 МПа) наблюдается двукратная локальная концентрация напряжений. Пуансон Р подвергается равномерному двусосному сжатию. Поэтому в нем напряжения σ_1 близки к нулю. Наиболее нагруженной деталью является изгибаемый коленвал С. В его средней части (вдали от буртиков) растягивающие напряжения (36,543 МПа) присутствуют, но на порядок меньше предела текучести $\sigma_m = 440$ МПа. Поэтому вал способен уверенно нести рабочую нагрузку.

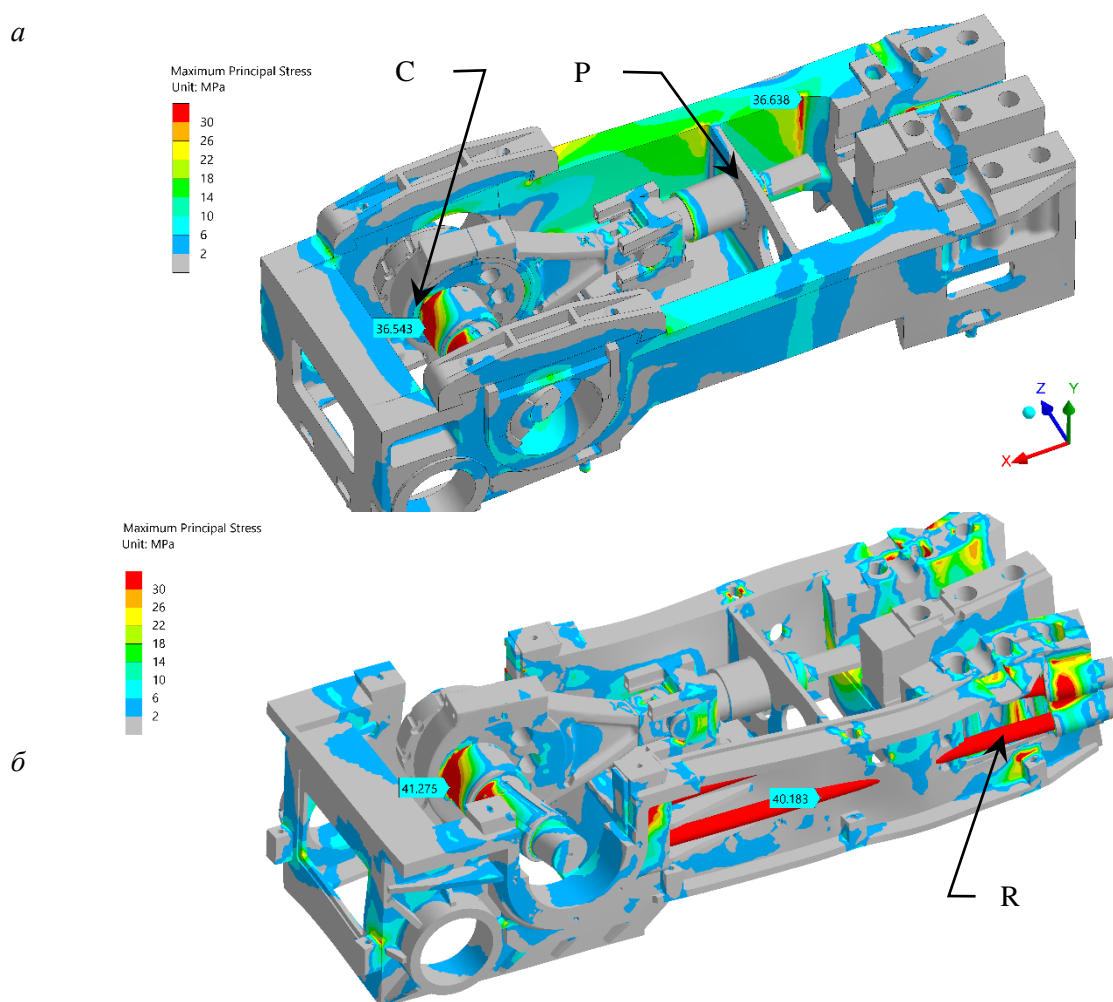


Рис. 3. Картины максимальных главных напряжений σ_1 (МПа) в прессе-автомате при номинальной распорной нагрузке 1,6 МН (ПиР-1) для СИВ (а; литая станина) и НИВ (б; облегченный сварной корпус + тяги с преднапряжением $F_{pret}^r = 400 \text{ кН}$); $\times 400$.

Для варианта НИВ (рис. 3, б) растягивающие напряжения в облегченном сварном корпусе оказываются меньше, чем в литом. Это связано с предварительным растяжением

тяг R , что создает в корпусе исходные продольные сжимающие напряжения. На растяжение в тягах указывает маркер 40,183 МПа.

Корпус на рис. 3, б визуально представляет более податливым. В нем больше локальных концентраторов растяжения. В районе ПГ они обусловлены натяжением тяг.

Коленчатый вал (41,275 МПа) напряжен на рис. 3, б практически также, как и на рис. 3, а. Следовательно исполнение корпуса (СИВ или НИВ) мало влияет на н. д. с. группы коленвала.

На рис. 4 представлены два варианта самого коленвала – цельный литой (рис. 4, а) и выточенный из прутка со сборными эксцентриками (на рис. 4, б не показаны).

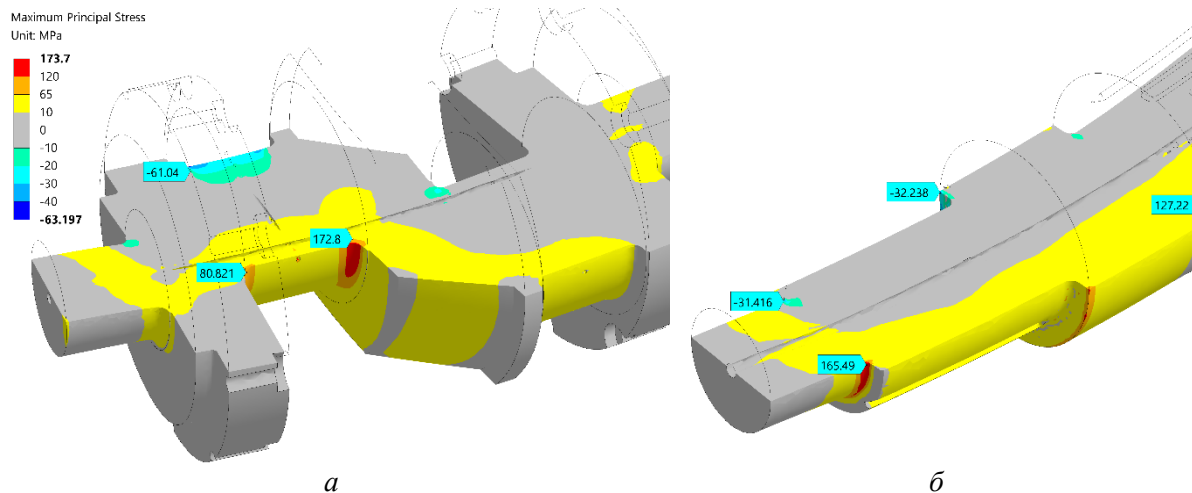


Рис. 4. Картины максимальных главных напряжений σ_1 (МПа) в литом коленвале (а; СИВ) и в коленвале из проката (б; НИВ); нагрузка ПиР-1 (1,6 МН); $\times 400$

Видно, что ключевыми объектами на обоих валах являются буртики (ступеньки) и галтели при них. Самым опасным местом на литом коленвале является срединная галтель 172,8 МПа. В коленвале из проката ведущим концентратором растяжений оказывается галтель шейки подшипника (165,49 МПа). В остальных местах обоих валов напряжения σ_1 лежат ниже 65 МПа (втрое ниже, чем на галтелях).

Итак, степень напряженности обоих коленвалов примерно совпадает. Она, в среднем, невысока. Однако, внимания требуют кольцевые концентраторы напряжений при буртиках.

Упруго-пластический анализ НС прессы при перегрузках. Оказалось, что сложно предсказать степень перегрузки машины при внезапном упоре пуансона в препятствие в прессовом канале. Все определяется локальной ситуацией перед пуансоном и требует специальных натурных экспериментов. В данной работе выясняется, как НС прессы отвечает на разные перегрузки. Они смоделированы в диапазоне от *ПуР-2* до *ПуР-10*.

Рис. 5 описывает н. д. с. прессы для 5-кратной перегрузки (*ПуР-5*). Картина эквивалентных напряжений σ_e (рис. 5, а) отражает по абсолютной величине высокие уровни растяжения, сжатия и сдвига. При достижении σ_e уровня предела текучести σ_T данного материала начинается пластическое течение.

Самой напряженной деталью оказывается сжатый одноосно пуансон (654,14 МПа). Однако, из-за высокого предела текучести закаленной инструментальной стали (>800 МПа) в нем пластического смятия не происходит.

Умеренно растянуты (166,15 МПа) упругие тяги. Несмотря на 5-кратную перегрузку, эквивалентные напряжения в корпусе невелики. Главного внимания требуют два региона – оголовки шатуна (357,31 МПа и 330,61 МПа) и буртики коленвала (421,6 МПа

и 416,21 МПа). Здесь эквивалентные напряжения соответствуют местным пределам текучести.

Начало пластического течения в указанных местах видно на картине эквивалентных пластических деформаций ε_{pl} (рис. 5, б). Серый фон рисунка указывает на упругое состояние почти всего пресса. В области 1 малое цветное пятно указывает на начало пластической деформации на буртике коленвала. В области 2 оголовка шатуна также на поверхности деформируется пластически.

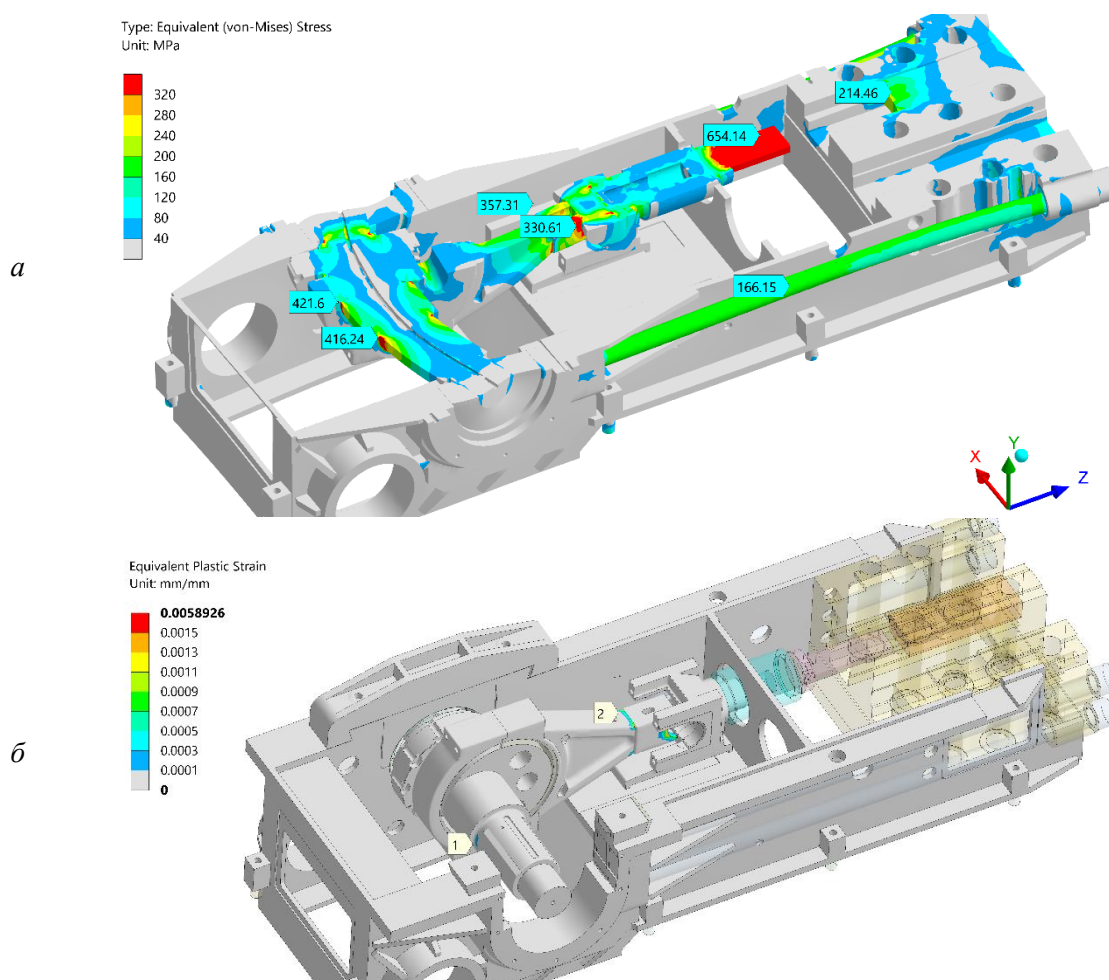


Рис. 5. Картина эквивалентных напряжений σ_e (а; МПа, $\times 100$) и эквивалентных пластических деформаций ε_{pl} (б; $\times 1$) для ПиР-5 (8 МН); НИВ, $F_{pret}^r = 1600 \text{ кН}$

Общая устойчивость НС пресса перед пластическим течением даже при 5-кратной перегрузке – это очень хороший результат с точки зрения живучести конструкции. Малые локальные пластические деформации стальных деталей – почти неизбежная черта реальной эксплуатации современных машин.

Рассмотрим теперь поведение НС пресса при более сильных перегрузках.

На рис. 6 представлены локальные картины эквивалентных пластических деформаций в ключевых деталях КПМ. Для ПиР-6 (рис. 6, а) оно строго локализовано. Здесь каждый маркер указывает на ОПД. На оголовке шатуна наблюдается смятие кромки (0,25 %) на контакте с осью. Также началось течение в тыльных углах оголовка (0,44 %).

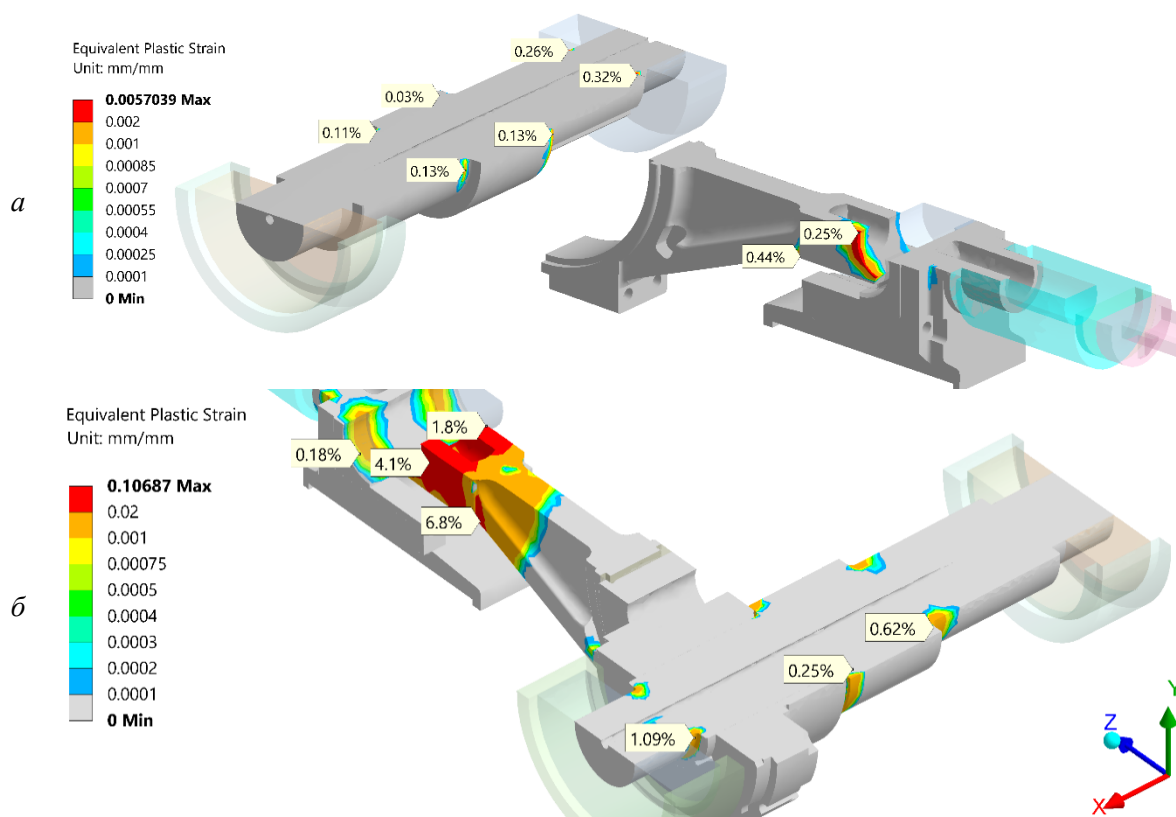


Рис. 6. Картины эквивалентных пластических деформаций ε_{pl} в КПМ для 6-кратной перегрузки (ПиР-6; 9,6 МН) для перегрузки на порядок (ПиР-10; 16 МН); $\times 1$

Коленвал ожидаемым образом пластически деформируется по галтелям и кромкам буртиков. С одной стороны вала присутствует пластическое сжатие (0,13 %; 0,13 %; 0,32 %). С другой – пластическое растяжение (0,11 %; 0,03 %; 0,26 %). Все ОПД на рис. 6, а следует считать местами допустимого пластического течения (деформации ниже ~0,4–0,5 %). Здесь ожидается только автофретирование.

Отметим, что ОПД на рис. 6, а аналогичны критическим точкам выживания КТВ, обсужденных для подобной ситуации в работе [7].

Нагружение до *ПиР-10* (рис. 6, б) приводит к недопустимой пластической сквозной деформации оголовка шатуна (6,8 %; 4,1 %; 1,8 %). Оголовок сминается, теряет точность и может разрушиться. Можно говорить, что оголовок превращается в пластический шарнир.

Шатун подлежит замене. Однако, он выступает как своего рода предохранитель, поглощающий существенную часть энергии толчка.

Коленвал при перегрузке по *ПиР-10* избегает сквозного необратимого деформирования. Пластическое течение остается локализованным возле трех буртиков. Однако, накопленная деформация местами (1,09 %; 0,61 %) недопустимо велика. Эксплуатация такого вала возможна только после локального восстановления поверхностного слоя, например, путем наплавки и поверхностной термообработки [8].

Итак, пресс в любом случае не должен подвергаться нагружению выше *ПиР-6*.

Обсуждение. Интересно рассмотреть изменение показателей н. д. с. КПМ по мере нарастания распорных сил. На абсциссе графиков (рис. 7) отложены ступени перегрузки машины от *ПиР-1* до *ПиР-10* (от 1,6 до 16 МН соответственно). В смысле деформационных перемещений (ордината, мм) на коленчатом валу (кривая *UZ crank*) пресс ведет себя линейно во всем диапазоне нагружения. Это указывает на его большую общую прочность. Масштабного пластического течения не происходит.

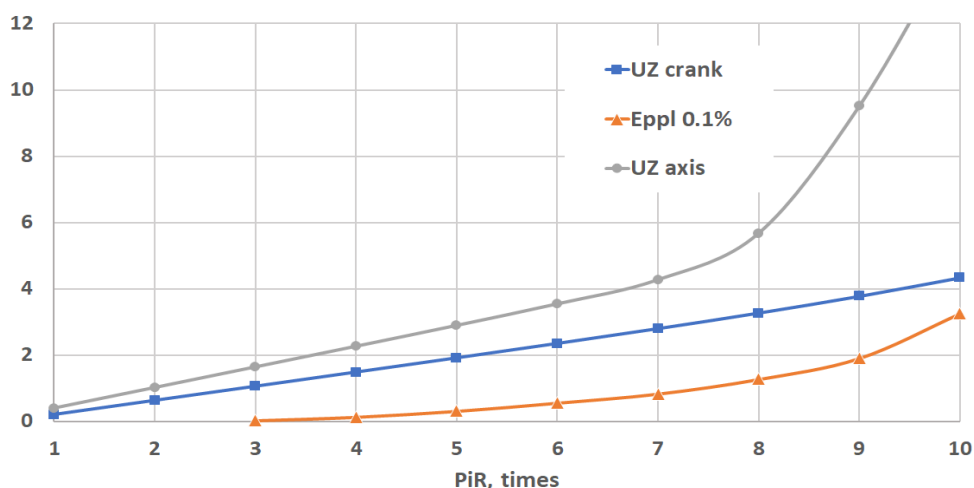


Рис. 7. Влияние кратности перегрузки (показатель PiR по абсциссе) на деформационные перемещения (мм) шейки коленвала (UZ crank) и оси ползуна (UZ axis), а также на эквивалентную пластическую деформацию ε_{pl} 0,5 на средней галтели коленвала

Кривая деформационного перемещения оси шатуна **UZ axis** резко поднимается вверх после *ПуР-7*. Это соответствует началу сквозного пластического течения в оголовке шатуна. Подтверждается, что шатун выступает в данной конструкции пресс-автомата в качестве «жертвенной» детали (*sacrificed structural part*). Возникающий на его оголовке пластический шарнир поглощает выше *ПуР-8* энергию сбойного нагружения.

Кривая **Eppl 0,1 %** показывает (в десятых долях процента) пластическую деформацию стали, накопленную на средней галтели коленвала. Локальное пластическое течение в этом ОПД стартует при трехкратном перегрузении пресса (*ПуР-3*). На рис. 7 видно, что при двукратном перегрузении (*ПуР-2*) пластических деформаций нет. Нагружение пресса-автомата является полностью упругим даже в локальных концентраторах напряжений.

Согласно кривой **Eppl 0,1 %** накопление пластической деформации на галтели идет линейно до *ПуР-6*, *ПуР-7*. Далее угол наклона кривой возрастает. Следовательно, локальное пластическое деформирование коленвала ускоряется и выходит за безопасные рамки.

Итак, несущая система пресса-автомата показывает способность выдерживать неограниченное число циклов при номинальном нагружении (многоцикловая усталость почти отсутствует). Двух-, трехкратная перегрузка допустима. Она не оставляет пластических следов. Автофретирование в безопасных границах (до $\varepsilon_{pl} \leq 0,5\%$) происходит приблизительно между *ПуР-3* и *ПуР-5*, *ПуР-6*. Перегрузение более, чем в 6 раз ведет к опасной малоцикловой усталости коленвала и сминанию оголовка шатуна. Эти режимы не допустимы.

Выводы:

1. Несущая система НС пресса-автомата для обоих структурных вариантов – *СИБ* и *НИВ* – является достаточно прочной. Все детали НС способны выдерживать многоцикловое нагружение при номинальных рабочих распорных силах до 1,6 МН (*ПуР-1*).

2. Наиболее податливой деталью НС является коленчатый вал. Галтели на буртиках вала являются концентраторами изгибных напряжений при распоре пресса во время в. м. т.

3. Пресс выдерживает спорадические перегрузки из-за упора пуансона в препятствие в канале прессования. При перегрузках до 3-х раз (*ПуР-3*; 4,8 МН) НС работает упруго.

4. Перегрузка в 6 раз (*ПуР-6*; 9,6 МН) является предельно допустимой. Формы деталей КПМ сохраняются. Однако, на буртиках коленвала появляются локализованные очаги пластической деформации. Ожидается эффект автофретирования.

5. При перегрузке НС пресса выше *Лип-6* оголовок шатуна берет на себя роль пластического предохранителя. Объемная пластическая деформация в нем поглощает кинетическую энергию КПМ. Оголовок шатуна превращается в пластический шарнир.

6. Для предотвращения пластического повреждения коленвала его галтели и буртики рекомендуется поверхностно упрочнить, например, ХТО или лазерной закалкой.

7. Для несущей системы пресса не требуется общий редизайн. Рекомендуется рассматривать оголовок шатуна как пластический предохранитель и оптимизировать для этой функции его дизайн (например, сделать оголовок сборным).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (2000) The finite element method. Butterworth-Heinemann, vol. 1: Basis. Oxford.

2. Довнар С. С., Якимович А. М. Прочностной виртуальный аудит и реновация крупногабаритных пеллетных прессов. – Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества: сборник материалов научно-практической конференции (Минск, 21 апреля 2022 г.) / Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2022. С. 116–119. ISBN 978-985-583-755-9. <https://rep.bntu.by/handle/data/111591>.

3. Stanislaw Dounar, Alexandre Iakimovitch, Katsiaryna Mishchanka, Andrzej Jakubowski, and Leszek Chybowski. (2020) FEA Simulation of the Biomechanical Structure Overload in the University Campus Planting. Applied Bionics and Biomechanics, Volume 2020, Article ID 8845385. <https://doi.org/10.1155/2020/8845385>.

4. Dounar, S., Iakimovitch, A. & Jakubowski, A. (2021) Finite element analysis of the dynamically created portal in the huge machine tool of “travelling column” type. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2021, 65 (137) <https://doi.org/10.17402/458>.

5. Jan A. Konig. Shakedown of Elastic-Plastic Structures. Elsevier, 1987.

6. Dixit, U., Kamal, S., Shufen, R. (2020). Autofrettage Processes. Boca Raton: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9780429425431>.

7. Dounar S., Iakimovitch A., Shirvel P., Jakubowski A., Chybowski L., Tanishq J. M., Penkina A. FEA-audit and local redesign of practice-proved laboratory centrifuge machine (2022) - Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник / Белорусский национальный технический университет; редкол.: Ю. В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 36. – С. 66–75. <https://rep.bntu.by/handle/data/110978>.

8. You Lv, Liqun Lei, and Lina Sun, “Influence of different combined severe shot peening and laser surface melting treatments on the fatigue performance of 20CrMnTi steel gear,” Materials Science and Engineering A, vol. 658, pp. 77–85, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.050>.

Поступила 03.10.2022

УДК 539.3

Дудяк А. И., Хвасько В. М., Дикан Ж. Г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ СТЕРЖНЯ ИЗ ДВУХ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье рассматривается стержень круглого поперечного сечения, выполненный из двух разнородных материалов. Исследуются напряжения и деформации, возникающие при кручении данного стержня.