




DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56
УДК 621.97.06

Научная статья / Research article

Устранение причин трещинообразования в ползуне мощного кривошипного штамповочного пресса

А.В. Корнилова^a  , Чжо Зяяр^b 

^aНациональный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация

^bМосковский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация
 anna44@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 5 ноября 2021 г.
Доработана: 22 февраля 2022 г.
Принята к публикации: 28 февраля 2022 г.

Ключевые слова:

кривошипный пресс, ползун, усталость
металла, трещины, ребра жесткости

Аннотация. Известно, что при длительной эксплуатации кривошипных машин для холодной листовой штамповки, заключающейся в циклическом нагружении конструкции механическими напряжениями, происходит усталостная деградация металла, приводящая к возникновению и росту трещин. Тем не менее основной тенденцией современных российских подходов к модернизации парка кузнечно-прессовых машин является стремление сохранить крупногабаритные металлоемкие детали штамповочных прессов при замене системы управления и узлов гидравлики и/или пневматики дополнительных исполнительных механизмов. Как показала практика, такой подход экономически и технологически оправдан. Страны, у которых нет мощностей для изготовления штамповочных машин собственных марок, покупают оборудование за рубежом (в том числе в России), как правило, из экономических соображений на рынке вторичных продаж после длительного периода эксплуатации. В этом случае требуется грамотная предпродажная подготовка, чтобы избежать аварийных ситуаций и отказов оборудования после его монтажа на предприятии-покупателе. Обеспечение долговечности кривошипных штамповочных машин после периода длительной эксплуатации – актуальная задача как для промышленности развивающихся стран, так и для российской. На примере мощного кривошипного листоштамповочного пресса, в процессе предпродажной подготовки которого выявлены трещины в ползуне, показан способ устранения причин трещинообразования при его дальнейшей эксплуатации.

Для цитирования

Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Устранение причин трещинообразования в ползуне мощного кривошипного штамповочного пресса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 47–56. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56>




Elimination of causes of crack formation in the slider of a powerful crank forming press

Anna V. Kornilova^a  , Kyaw Zaya^b 

^aMoscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

^bMoscow State Technological University “STANKIN,” Moscow, Russian Federation

 anna44@yandex.ru

Article history

Received: November 5, 2021

Revised: February 22, 2022

Accepted: February 28, 2022

Keywords:

crank press, slider, metal fatigue cracks, stiffeners

Abstract. It is known that during long-term operation of crank machines for cold sheet stamping, which consists in cyclic loading of the structure with mechanical stresses, fatigue degradation of the metal occurs, leading to the occurrence and growth of cracks. Nevertheless, the main trend of modern Russian approaches to modernizing the park of forging and pressing machines is the desire to preserve large metal-consuming parts of stamping presses when replacing the control system and hydraulic and/or pneumatic components of additional actuators. Practice has shown that such approach is economically and technologically justified. For countries that do not have the capacity to manufacture stamping machines of their own brands, there is a need to purchase equipment abroad (including Russia), usually for economic reasons in the secondary market after a long period of operation. In this case, competent pre-sale preparation is required in order to avoid emergencies and equipment failures after its installation at the purchasing enterprise. Ensuring the durability of crank stamping machines after a period of long-term operation is an urgent task, both for the industry of developing countries and for the Russian one. Using the example of a powerful crank stamping press, during the pre-sale preparation of which cracks in the slider were revealed, a way to eliminate the causes of cracking during its further operation is shown.

For citation

Kornilova AV, Kyaw Zaya. Elimination of causes of crack formation in the slider of a powerful crank forming press. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):47–56. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56>

Введение

Проблема обеспечения надежной работы оборудования машиностроительных производств в настоящее время становится все более актуальной, так как старение оборудования во многих отраслях промышленности значительно опережает темпы технического перевооружения¹. Коснулась она и отрасли производства кузнечно-прессового оборудования [1]. Основной причиной выхода из строя стареющего оборудования практически любого назначения являются усталостные трещины [2–4]. Существуют различные подходы к изучению этого вопроса, касающиеся как развития лабораторных исследований [5], так и привлечения сложного

математического аппарата к описанию явлений, происходящих при циклическом приложении механических напряжений к деталям оборудования при выполнении технологических операций [6]. Но решения пока нет.

Для мощных технологических машин развитие и рост усталостных трещин напрямую связан с промышленной безопасностью [7]. Известно, что при производстве большинства изделий военного назначения и народного потребления используются операции штамповки, которые производятся на кривошипных штамповочных прессах [8]. Технологии штамповки непрерывно развиваются [9]. Для внедрения новых технологий необходимы новые технологические машины. Однако в силу низких темпов технического перевооружения главной тенденцией является модернизация существующего оборудования. При модернизации парка кузнечно-прессовых машин,

¹ Возраст оборудования машиностроительного комплекса на примере отдельных предприятий отрасли. URL: <https://aftershock.news/?q=node/361989&full> (дата обращения: 25.12.2021).

в частности кривошипных штамповочных, стремясь сохранить крупногабаритные металлоемкие детали при замене системы управления и узлов гидравлики и/или пневматики дополнительных исполнительных механизмов. Такой подход в России экономически и технологически оправдан.

Для стран, у которых нет мощностей для изготовления штамповочных машин собственных марок, существует необходимость покупки оборудования за рубежом, как правило, из экономических соображений на рынке вторичных продаж после длительного периода эксплуатации. Это привело к образованию большого рынка вторичной продажи прессов, в том числе в Индию и страны Юго-Восточной Азии. Бывает, что к моменту продажи машина меняет третьего и более хозяев. В этом случае требуется грамотная предпродажная подготовка, чтобы избежать аварийных ситуаций и отказов оборудования после его монтажа на предприятии-покупателе. Обеспечение долговечности кривошипных штамповочных машин после периода длительной эксплуатации актуально как для промышленности развивающихся стран, так и для российской. Это требует подходов, основанных на математическом моделировании, методах неразрушающего контроля и экспериментальных исследованиях. Рассмотрим способы устранения причин трещинообразования в деталях

технологического оборудования на примере мощного кривошипного листоштамповочного пресса, в процессе предпродажной подготовки которого выявлены трещины в ползуне.

Объектом исследования стал пресс номинальной силой 800 тс (8 МН), массой 150 т, предназначенный для операций холодной листовой штамповки – вырубки/пробивки, резки, проколки, надрезки, обрезки, гибки, скручивания. Штамповка может производиться на двух позициях. Пресс (рис. 1) находился в интенсивной эксплуатации с 1989 г. Материал ползуна – сталь марки 1.1181 немецкого производства, которая является аналогом российской стали 35 [10]. Так как при обследовании ползуна пресса не представлялось возможным осуществить вырезку образцов для определения механических характеристик металла, то согласно [11] принималась величина предела прочности (временного сопротивления разрыву) 530 МПа. В процессе предпродажной подготовки выявлены трещины в ползуне и принято решение, что все выявленные дефекты будут исправлены в процессе монтажа на производственной площадке покупателя. На основе математического моделирования и экспериментальных исследований установлены причины трещинообразования, частично показанные в [12].

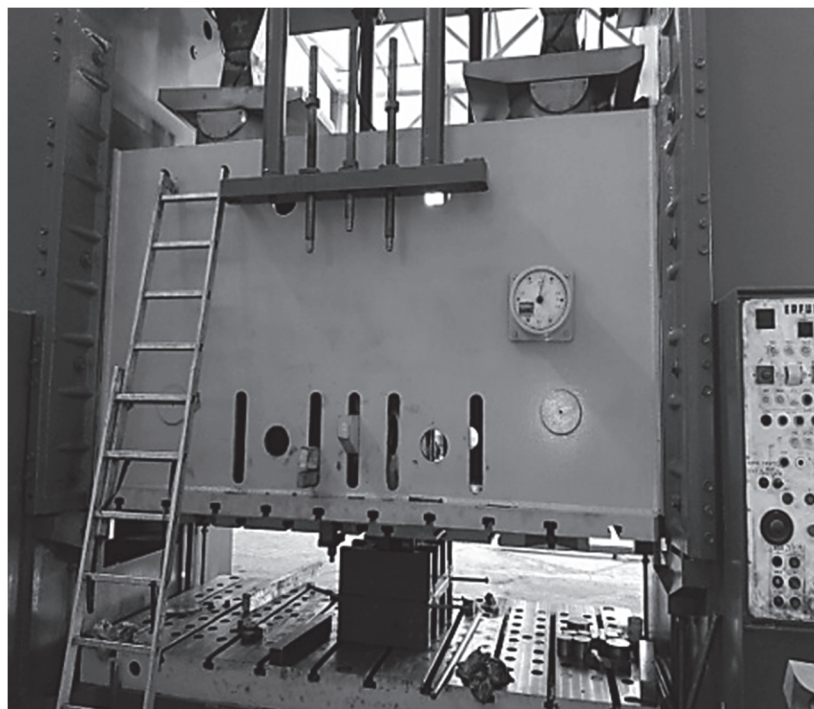


Рис. 1. Рабочая зона исследуемого пресса (фото Чжо Зяяр)
Figure 1. Working area of the studied press (photo by Kyaw Zaya)



Рис. 2. Трещины в ползуне, выявленные в процессе обследования (фото Чжо Заяр)
Figure 2. Cracks in the slider revealed during the examination (photo by Kyaw Zaya)

1. Моделирование напряженно-деформированного состояния ползуна для выявления причин трещинообразования

Для определения причин трещинообразования и разработки мероприятий по их устранению проведен вычислительный эксперимент. Создана трехмерная модель ползуна исследуемого пресса по натурным замерам на объекте со всеми изменениями, внесенными при эксплуатации пресса (рис. 3), то есть с параметрами, отличающимися от заданных чертежами.

Выполнены два варианта расчета: 1) силы на рабочей поверхности ползуна равны по величине и приложены симметрично относительно плоскости симметрии ползуна, перпендикулярной фронту пресса; 2) приложение сил на одну пози-

цию на рабочей поверхности ползуна в 2 раза больше силы, приложенной ко второй. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Оценка напряженно-деформированного состояния ползуна производилась методом конечных элементов с помощью пакета прикладных программ SolidWorks с конечно-элементным анализом (МКЭ-FEA) [13; 14]. Расчет численным методом выявил, что неодинаковость приложения нагрузки на двух рабочих позициях привела к образованию трещин в сварном соединении рабочей поверхности ползуна за счет увеличения максимальных напряжений и смещения зоны их действия к сварному шву, где и сформировалась усталостная трещина (рис. 3–5).

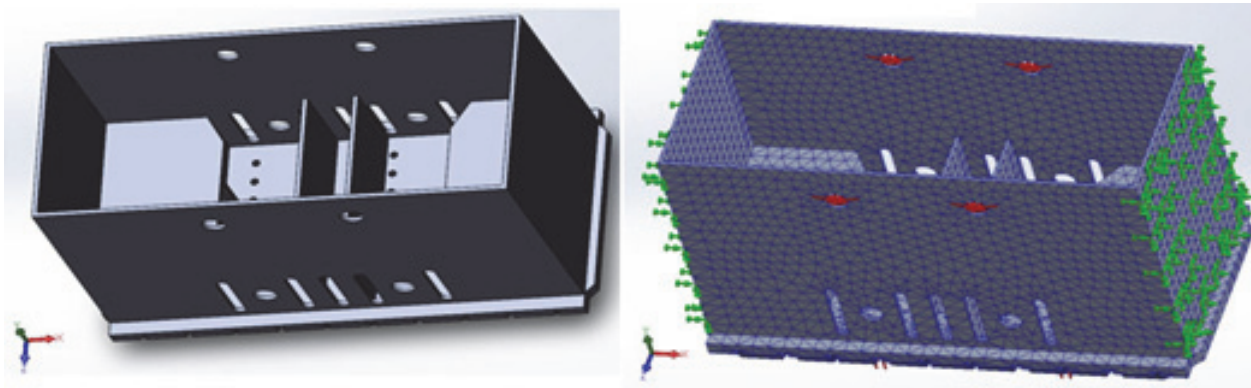


Рис. 3. Модель ползуна (существующий вариант)
Figure 3. Slider model (existing version)

Таблица 1

Результаты расчета ползуна (предпродажный вариант)

Вариант расчета	Величины в месте формирования усталостного дефекта					
	Эквивалентные напряжения, МПа	Осевые напряжения, МПа			Перемещения по линии действия технологической силы (ось Y), мм	Деформация
		X	Y	Z		
1	150	34	12	78	1,4	8×10^{-4}
2	200	67	20	95	2,1	$1,5 \times 10^{-3}$

Table 1

Slider calculation results (pre-sale option)

Calculation option	The values are indicated at the place of formation of the fatigue defect					
	Equivalent stresses, MPa	Axial stresses, MPa			Displacement along the line of action of technological force (axis Y), mm	Deformation
		X	Y	Z		
1	150	34	12	78	1.4	8×10^{-4}
2	200	67	20	95	2.1	1.5×10^{-3}

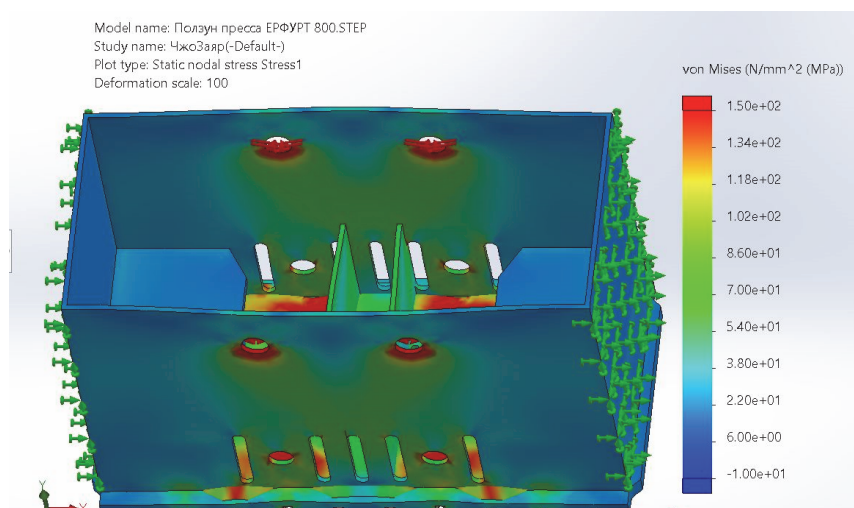


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по IV теории прочности (Губера, Мизеса, Генки). Приложение равных технологических сил на двух позициях (распределенная нагрузка 15 МПа)

Figure 4. Equivalent stresses according to IV theory of strength (Huber, Mises, Genki). Application of equal technological forces in two positions (distributed load 15 MPa)

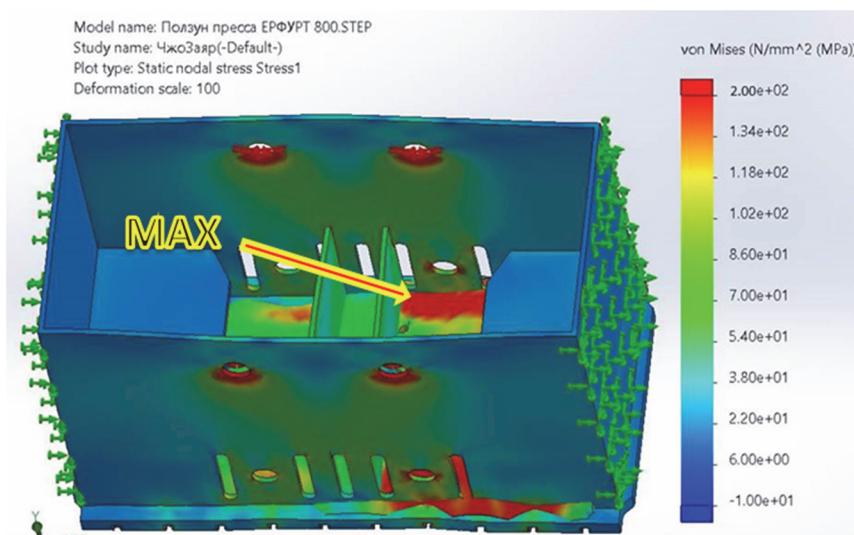


Рис. 5. Эквивалентные напряжения по IV теории прочности (Губера, Мизеса, Генки). Приложение технологических сил на двух позициях различное по величине (распределенные нагрузки 10 и 20 МПа)

Figure 5. Equivalent stresses according to IV theory of strength (Huber, Mises, Genki). The application of technological forces in the two positions is different (distributed loads 10 and 20 MPa)

2. Моделирование напряженно-деформированного состояния ползуна с ребрами жесткости

Вопросам возникновения и роста дефектов при циклическом приложении механических напряжений в деталях конструкций различного назначения посвящены работы [15–17]. Показано, что наиболее эффективно сказывается на замедлении процесса формирования и роста усталостных дефектов снижение уровня напряжений. В [18] проведен подробный анализ возможных дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин, описаны возможные сценарии развития эллиптических, полуэллиптических и сквозных дефектов. Там же приведен разработанный авторами способ торможения трещин путем снижения технологических сил машины.

Но в рассматриваемой задаче данный подход оказался не применим. Покупателю важно было сохранить номинальную силу пресса и возможность одновременной штамповки на двух пози-

циях. Поэтому было принято решение после разделки и заварки образовавшихся усталостных трещин повысить местную жесткость путем установки ребер жесткости внутри ползуна исходя из конструктивных возможностей. Очевидно, что полностью устранить саму возможность приложения неодинаковых по величине сил на двух позициях двухпозиционного пресса невозможно даже при соблюдении всех технологических инструкций. Она может возникнуть из-за разнотолщинности материала (в том числе в пределах допуска), разных механических свойств заготовок на двух позициях и т. д. В связи с этим был проведен расчет напряженно-деформированного состояния ползуна с установленными ребрами жесткости по двум вариантам – силы на двух позициях одинаковые (вариант 3, рис. 6) и с разными силами, аналогично варианту 2 в расчете вышеприведенного предпродажного варианта (вариант 4). Данные расчета сведены в табл. 2.

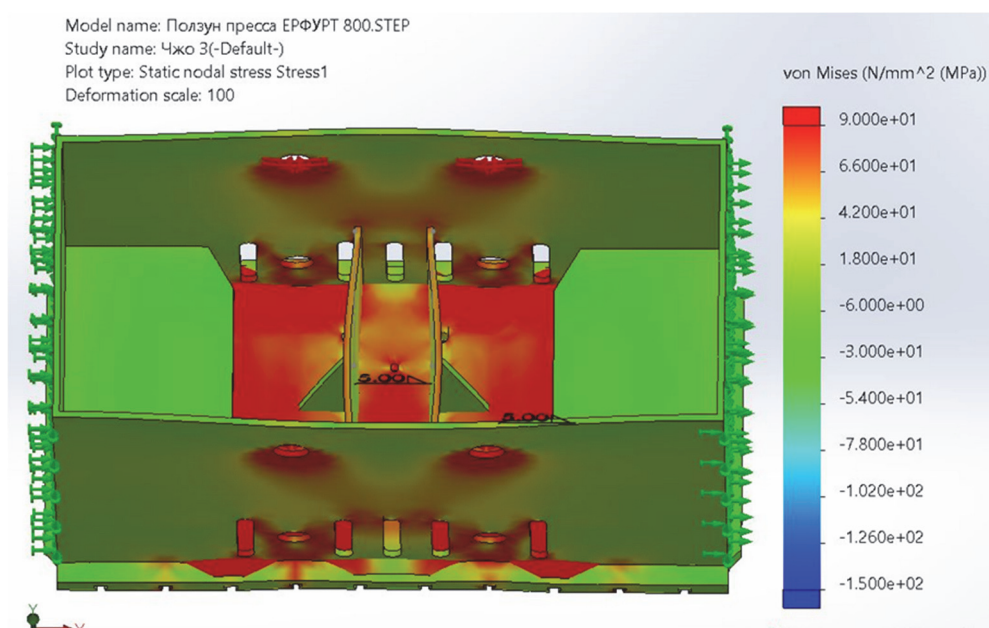


Рис. 6. Эквивалентные напряжения по IV теории прочности (Губера, Мизеса, Генки). Вариант расчета с установленными ребрами жесткости. Приложение равных технологических сил на двух позициях (распределенная нагрузка 15 МПа)
Figure 6. Equivalent stresses according to IV theory of strength (Huber, Mises, Genki). Calculation option with stiffeners installed. Application of equal technological forces in two positions (distributed load 15 MPa)

Таблица 2

Результаты расчета ползуна с установленными ребрами жесткости

Вариант расчета	Величины в месте формирования усталостного дефекта					Перемещения по линии действия технологической силы (ось Y), мм	Деформация
	Эквивалентные напряжения, МПа	Осевые напряжения, МПа					
		X	Y	Z			
3	90	6	18	42	1,14	5×10^{-4}	
4	110	12	30	51	1,72	$9,4 \times 10^{-4}$	

Table 2

Calculation option	Results of calculating a slider with stiffeners installed					
	The values are indicated at the place of formation of the fatigue defect					
	Equivalent stresses, MPa	Axial stresses, MPa			Displacement along the line of action of technological force (axis Y), mm	Deformation
		X	Y	Z		
3	90	6	18	42	1.14	5×10^{-4}
4	110	12	30	51	1.72	9.4×10^{-4}

3. Циклическая долговечность ползуна при различных вариантах нагружения

Далее была рассчитана циклическая прочность (долговечность) ползуна исследуемого пресса. Примем, что напряжения меняются по синусоидальному закону [20] при коэффициенте асимметрии 0 (пульсирующие циклы) с условием соблюдения всех правил обслуживания и эксплуатации машины. Значение коэффициента чувствительности материала к асимметрии цикла ψ , согласно действующему ГОСТу 25.504-82²,

$$\psi = 0,02 + 2 \times 10^{-4} \sigma_{\text{в}}. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае для стали марки 1.1181 по (1) $\psi = 0,13$. Приведенные к симметричным циклам напряжения (с коэффициентом асимметрии -1) определяются следующим образом:

$$\sigma_{\text{апр}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{2} (1 + \psi). \quad (2)$$

Расчетные данные $\sigma_{\text{апр}}$ для четырех вариантов расчета напряженно-деформированного состояния ползуна приведены в табл. 3. Принимаем согласно ГОСТ 25.504-82 для коэффициента асимметрии цикла -1 величину предела выносливости материала ползуна:

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 10^{-4} \sigma_{\text{в}}) \sigma_{\text{в}}. \quad (3)$$

По (3) $\sigma_{-1} = 263$ МПа. Далее определяем коэффициенты, математически описывающие снижение предела выносливости:

– масштабный коэффициент (фактор) принимается по ГОСТ 25.504-82 – $\varepsilon_{\text{мф}} = 0,5$;

² ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Издательство стандартов, 1982. 55 с.

– коэффициент, зависящий от качества обработки поверхности по [19],

$$\varepsilon_{\text{мо}} = 1 - 0,22 \log R_z \left(\log \frac{\sigma_{\text{в}}}{20} - 1 \right). \quad (4)$$

Параметр качества обработки поверхности принимается $R_z = 100$. По (4) получаем $0,81$:

– коэффициент, зависящий от влияния сварки, согласно ГОСТ 25.504-82, – $\varepsilon_{\text{св}} = 0,6$;

– принимается допущение, что материал абсолютно чувствителен к надрезам.

Предел выносливости ползуна $\sigma_{-1п}$ с учетом всех снижающих факторов составит 64 МПа. Число циклов до разрушения по кривой А. Веллера, построенной в полулогарифмических координатах, определяется согласно [19] следующим образом:

$$N = N_0 10^{\frac{\sigma_{-1п} - \sigma_{\text{апр}}}{k}}, \quad (5)$$

где N_0 – базовое число циклов (принимается 10^7); k – параметр, равный тангенсу наклона ветви многоциклового усталости кривой А. Веллера в полулогарифмических координатах (53 МПа).

Полученные значения долговечности приведены в табл. 3. Также рассчитано число циклов формирования усталостного дефекта. Расчет велся по гипотезе накопления усталостной повреждаемости Мэнсона [19]. Мэнсон предположил, что усталостный процесс нужно подразделить на основные фазы – зарождения трещины и развития трещины до критической величины (соответствующей моменту разрушения). Это позволяет оценить длительность каждой фазы отдельно. В работе Мэнсона [20] для оценки фазы развития трещины применены следующие выражения:

$$N_p = PN^p, \quad (6)$$

где N_p – число циклов распространения трещины после ее образования (число циклов роста дефекта);

N – полное число циклов до разрушения; P и p – экспериментально определенные коэффициенты.

Число циклов зарождения (формирования) трещины:

$$N' = N - N^p. \quad (7)$$

По многочисленным экспериментам Мэнсоном установлено, что $p = 0,6$, $P = 14$ за всех типов

стали. Следовательно, согласно (6) и (7), можно записать:

$$N' = N - 14N^{0,6}. \quad (8)$$

Анализ расчетных данных из табл. 3 показал, что неодинаковое приложение нагрузки на рабочих позициях в 3,5 раза ускоряет формирование усталостных дефектов.

Таблица 3

Расчетные долговечности (число циклов нагружения)

1	Максимальные эквивалентные напряжения цикла (расчет МКЭ), МПа	150 Вариант 1	200 Вариант 2	90 Вариант 3	110 Вариант 4
2	Напряжения, приведенные к симметричным циклам по (2), МПа	85	113	51	62
3	Число циклов до разрушения по (5)	4×10^6	$1,2 \times 10^6$	∞ так как $\sigma_{-1п} > \sigma_{апр}$	∞ так как $\sigma_{-1п} > \sigma_{апр}$
4	Число циклов формирования дефекта по билинейному правилу Мэнсона по (8)	$3,9 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$	∞	∞

Table 3

Design life (number of loading cycles)

1	Maximum equivalent cycle stresses (calculation of FEM), МПа	150 Option 1	200 Option 2	90 Option 3	110 Option 4
2	Stresses reduced to symmetrical cycles according to (2), МПа	85	113	51	62
3	Number of cycles before failure according to (5)	4×10^6	1.2×10^6	∞ because $\sigma_{-1sl} > \sigma_{ared}$	∞ because $\sigma_{-1п} > \sigma_{ared}$
4	The number of defect formation cycles according to the Manson bilinear rule according to (8)	3.9×10^6	1.1×10^6	∞	∞

Заключение

На основании проведенного инженерного исследования можно заключить следующее:

– основной причиной трещинообразования в ползуне мощного кривошипного штамповочного прессы является несимметричное относительно плоскости симметрии ползуна, перпендикулярной фронту прессы, приложение технологической силы (разные технологические силы на двух штамповочных позициях). Неравномерное приложение нагрузки на рабочих позициях в 3,5 раза ускоряет формирование усталостных дефектов;

– установка ребер жесткости внутри ползуна позволяет вывести ползун из зоны трещинообразования даже при несимметричном приложении нагрузки на штамповочных позициях, что доказывает эффективность метода повышения местной жесткости конструкции с трещиной;

– предложенное конструктивное решение позволяет минимизировать изгибные напряжения в зоне сварки у вновь разрабатываемых кузнечно-прессовых машин этого класса.

Список литературы

1. Трухин Ю.Г., Чукардин В.И. О проблемах развития отрасли производства кузнечно-прессового оборудования в России // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 2. С. 44–48.

2. Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Burov A.E., Aniskovich E.V., Cherniaev A.P., Khalimanovich V.I. Experimental study of the strength and durability of metal-composite high-pressure tanks // *Inorganic Materials*. 2020. Vol. 56. No. 15. Pp. 1478–1484. <https://doi.org/10.1134/S0020168520150108>

3. Moskvichev V.V., Chaban E.A. Analysis of propagation of fatigue cracks in crane girders // *Inorga-*

nic Materials. 2019. Vol. 55. No. 15. Pp. 1496–1502. <https://doi.org/10.1134/S0020168519150123>

4. Gadolina I.V., Makhutov N.A., Erpalov A.V. Varied approaches to loading assessment in fatigue studies // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 144. 106035. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106035>

5. Махутов Н.А. Развитие лабораторных исследований и диагностики материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 1–1. С. 5–13. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-5-13>

6. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка вероятности усталостного разрушения с использованием байесовских процедур // *Деформация и разрушение материалов*. 2021. № 12. С. 2–10.

7. Makhutov N.A., Nadein V.A., Gadenin M.M., Reznikov D.O. Risk and industrial safety // *Reliability: Theory & Applications*. 2022. Vol. 17. No. 3 (66). Pp. 138–143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>

8. Бурдуковский В.Г., Инатович Ю.В. Оборудование кузнечно-штамповочных цехов. Кривошипные машины. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 168 с.

9. Remyantsev M.I., Tulupov O.N. Further developments in simulation of metal forming processes // *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 16. Pp. 21–24. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2018.02.04>

10. Международный транслятор современных сталей и сплавов. Сортамент: в 4 т. Т. IV. Сортамент черных металлов. Кн. 2 / под ред. М.С. Блантера, В.С. Кершенбаума. М.: Союз научных инженерных обществ, 1995. 300 с. (Серия: Международная инженерная энциклопедия).

11. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф., Жаров В.В., Колосков М.М., Орлов А.С., Скоробогатых В.Н. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. М., 2014. 1216 с.

12. Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Причины трещинообразования в ползуне пресса ERFURT PKZZ I 800 // *Инженерные системы – 2021: труды международной конференции*. М.: РУДН, 2021. С. 42–47.

13. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс. 2010. 646 с.

14. James D.B. Engineering design and graphics with SOLIDWORKS 2016. Boston: Pearson, 2016. 829 p.

15. Kornilova A.V., Kyaw Zaya, Toptygin K.P. Determination of critical parameters of defects in aircraft skin by fracture mechanics criteria method // *Advances in the Astronautical Sciences*. Magnitogorsk, 2021. Pp. 605–612.

16. Kornilova A.V., Zaya K., Paing T., Dobrolyubova M.F. Properties of metallic materials near the edges of fatigue crack // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1687. No. 1. 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012028>

17. Корнилова А.В., Идармачев И.М., Чжо Зяяр, Паинг Т. Практические аспекты оценки повреждае-

мость в условиях многоциклового усталости: монография. М.: Перо, 2020. 115 с.

18. Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 4. С. 308–315. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315>

19. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

20. Manson S.S. Interfaces between fatigue, creep, and fracture // *International Journal of Fracture Mechanics*. 1966. Vol. 2. No. 327. Pp. 127–130. <https://doi.org/10.1007/BF00188825>

References

1. Trukhin YuG, Chukardin VI. On the problems of development of the industry of production of forging and pressing equipment in Russia. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2021;(2):44–48. (In Russ.)

2. Lepikhin AM, Moskvichev VV, Burov AE, Aniskovich EV, Cherniaev AP, Khalimanovich VI. Experimental study of the strength and durability of metal-composite high-pressure tanks. *Inorganic Materials*. 2020;56(15):1478–1484. <https://doi.org/10.1134/S0020168520150108>

3. Moskvichev VV, Chaban EA. Analysis of propagation of fatigue cracks in crane girders. *Inorganic Materials*. 2019;55(15):1496–1502. <https://doi.org/10.1134/S0020168519150123>

4. Gadolina IV, Makhutov NA, Erpalov AV. Varied approaches to loading assessment in fatigue studies. *International Journal of Fatigue*. 2021;144:106035. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106035>

5. Makhutov NA. Development of laboratory research and diagnostics of materials. *Factory Laboratory. Material Diagnostics*. 2022;88(1–1):5–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-5-13>

6. Makhutov NA, Reznikov DO. Estimation of the fatigue failure probability using Bayesian procedures. *Deformation and Destruction of Materials*. 2021;(12):2–10. (In Russ.)

7. Makhutov NA, Nadein VA, Gadenin MM, Reznikov DO. Risk and industrial safety. *Reliability: Theory & Applications*. 2022;17(3(66)):138–143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>

8. Burdukovsky VG, Inatovich YuV. *Equipment for forging and stamping shops. Crank machines*. Yekaterinburg: Izd-vo Uralskogo Universiteta Publ.; 2018. (In Russ.)

9. Remyantsev MI, Tulupov ON. Further developments in simulation of metal forming processes. *CIS Iron and Steel Review*. 2018;16:21–24. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2018.02.04>

10. Blanter MS, Kershenbaum VYa. (eds.) *International translator of modern steels and alloys. Assortment. Vol. 4. Range of ferrous metals* (book 2). Moscow: Union of Scientific and Engineering Societies; 1995.
11. Dragunov YuG, Zubchenko AS, Kashirskii YuV, Degtyarev AF, Zharov VV, Koloskov MM, Orlov AS, Skorobogatykh VN. *Brand of steels and alloys* (Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko, eds.). 4th ed., revis. and add. Moscow; 2014. (In Russ.)
12. Kornilova AV, Kyaw Zaya. Reasons for cracking in the slider of the ERFURT PKZZ I 800 press. *Engineering Systems – 2021: Proceedings of the International Conference*. Moscow: RUDN University; 2021. p. 42–47. (In Russ.)
13. Alyamovsky AA. *Engineering Calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press; 2010. (In Russ.)
14. James DB. *Engineering Design and Graphics with SOLIDWORKS 2016*. Boston: Pearson; 2016.
15. Kornilova AV, Kyaw Zaya, Toptygin KP. Determination of critical parameters of defects in aircraft skin by fracture mechanics criteria method. *Advances in the Astronautical Sciences*. Magnitogorsk; 2021. p. 605–612.
16. Kornilova A, Kyaw Zaya, Paing T, Dobrolyubova MF. Properties of metallic materials near the edges of fatigue crack. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1687(1):012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012028>
17. Kornilova AV, Idarmachev I, Kyaw Zaya, Paing T. *Practical aspects of damage assessment under high-cycle fatigue conditions*. Moscow: Pero Publ.; 2020. (In Russ.)
18. Kornilova AV, Kyaw Zaya. Definition of acceptable parameters of defects in basic details of forging and pressmachines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):308–315. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315>
19. Kogaev VP. *Strength calculations at variable voltages in time*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1993. (In Russ.)
20. Manson SS. Interfaces between fatigue, creep, and fracture. *International Journal of Fracture Mechanic*. 1966; 2(327):127–130. <https://doi.org/10.1007/BF00188825>

Сведения об авторах

Корнилова Анна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры испытания сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26. ORCID: 0000-0001-5569-9320, Scopus AuthorID: 7004499009, Researcher ID: U-3353-2017, eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240. E-mail: anna44@yandex.ru

Чжоу Заяр, аспирант, кафедра композиционных материалов, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1. ORCID: 0000-0003-0131-1399, Scopus AuthorID: 56416430100. E-mail: k.kyawzaya@yandex.ru

About the authors

Anna V. Kornilova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5569-9320, Scopus Author ID: 7004499009, Researcher ID: U-3353-2017, eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240. E-mail: anna44@yandex.ru

Kyaw Zaya, postgraduate, Department of Composite Materials, Moscow State Technological University “STANKIN,” 1 Vadkovskii Pereulok, Moscow, 127055, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0131-1399, Scopus Author ID: 56416430100. E-mail: k.kyawzaya@yandex.ru