

УДК 621.771.074

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЕКТОРОВ-ШТАМПОВ И СИСТЕМЫ ИХ КРЕПЛЕНИЯ НА РАБОЧИХ ВАЛАХ КОВОЧНЫХ ВАЛЬЦОВ ОТКРЫТОГО ТИПА

© 2026 С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин, Р. М. Амхадов, Е. А. Яновская

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 03.02.2026

В статье представлена методика оценки работоспособности инструментальной оснастки консольных ковочных вальцов открытого типа, основанная на сочетании компьютерного анализа методом конечных элементов (МКЭ) и аналитического моделирования напряженно – деформированного состояния (НДС) секторов-штампов.

Основное внимание уделено построению регрессионной модели, описывающей взаимосвязь максимальных эквивалентных напряжений с температурными значениями, коэффициентом концентрации напряжений и силами воздействия на инструмент в процессе горячей вальцовки в овальном, круглом и квадратном калибрах. В рамках предложенного подхода выполнено сравнение расчётных данных, полученных МКЭ с результатами аналитической аппроксимации методом наименьших квадратов (МНК). Проведена оценка адекватности регрессионной модели по основным критериям Фишера и Стьюдента, а также тестам Шапиро-Уилка, Броуша – Пагана и Уайта. Ресурс работы секторов-штампов оценивался на основе определения усталостной долговечности по модели Баскина. Разработанная модель позволила количественно оценить влияние ключевых факторов на уровень напряжений в секторе-штампе и установить, какие параметры оказывают наиболее существенное влияние на формирование НДС. В частности, показано, что при увеличении силы деформирования и коэффициента концентрации напряжений происходит рост максимальных эквивалентных напряжений, тогда как изменение температуры в исследуемом диапазоне оказывает незначительное влияние.

Ключевые слова: вальцовка, сектор-штамп, калибр, компьютерное моделирование, пятно контакта, напряженно-деформированное состояние, аналитическая регрессионная модель.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-218-232

EDN: DVIFRN

ВВЕДЕНИЕ

Технологическая подготовка производства поковок способом горячей объемной штамповки (ГОШ) является многоэтапным процессом и, кроме разработки технологии изготовления полуфабриката или поковки [1–3], ориентированного на определенный вид кузнечно-штамповочного оборудования [4–6], включает этап проектирования деформирующих инструментов. Не менее важным подготовительным этапом является выявление недостатков новой технологии и проверка работоспособности инструментальной оснастки. Как правило, задачи решаются с помощью математического моделирования [7–10] по аналитическим зависимостям или методом конечно-элементного (МКЭ) моделирования в объектно-ориентированных программных комплексах, таких как *QFORM*, *DEFORM* и других [11–13], с последующим проведением анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) при различных термомеханических режимах для определения параметров прочности инструментальной оснастки и отдельных узлов оборудования [14]. Необходимо также уделить внимание тщательному проектированию рабочих поверхностей секторов-штампов [15] и обоснованию надежности выбранной конструкции инструмента, т. к. от этого будет зависеть повторяемость формы и размеров полуфабрикатов, влияющих на качество заполнения окончательного ручья при получении готовой поковки.

В некоторых технологиях ГОШ кроме основного оборудования, как, например - молот, кривошипный горячештамповочный (КГШП), винтовой или гидравлический пресс, для реализации заготовительных переходов обработки металлов давлением (ОМД), заключающихся в предварительном формоизменении заготовки перед окончательной операцией, используют вспомогательное оборудование [16]. Применение профилированных полуфабрикатов позволяет использовать прессовое оборудование. Кроме того, данный подход обеспечивает минимальное количество переходов

Рогулин Сергей Александрович, аспирант кафедры СПД. E-mail: serzh.rogulin2013@yandex.ru

Сосенушкин Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой композиционных материалов. E-mail: sen@stankin.ru

Амхадов Руслан Магаматович, аспирант кафедры ВТО. E-mail: sarmak5555@mail.ru

Яновская Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики.

E-mail: elena_yanovskaya@bk.ru

в процессе штамповки поковок удлиненной формы на КГШП, способствуя упрощению конструкций штампов, сокращению материальных затрат на их изготовление, что приводит к снижению себестоимости готовой продукции и повышению производительности. В качестве оборудования для заготовительных операций могут использоваться ковочные вальцы [17], рабочие валы которых оснащают секторами-штампами по количеству переходов, необходимых для профилирования заготовки. В зависимости от типов и вариантов конструкции оборудования, существуют различные способы установки и фиксации секторных инструментов на рабочих валах [18,19].

Объектом исследования являются секторы-штампы и система их крепления и фиксации на рабочих валах консольных ковочных вальцов открытого типа модели CA1335, которая описана в работах [20-22] и имеет схожие варианты способов креплений [23-25].

Цель исследования заключается в проведении анализа напряженно-деформированного состояния в момент максимальных нагрузок, воспринимаемых секторами-штампами и передаваемых на элементы конструкции машины, являющихся исходными данными для расчета прочностных параметров и степени влияния температурного фактора на усталостные характеристики элементов конструкции. А также построение аналитической модели, устанавливающей зависимость прочностных характеристик секторов-штампов от энергосиловых и температурных режимов горячей вальцовки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исследование НДС и прочности конструкции с помощью компьютерного моделирования производится в программе *SolidWorks Simulation*, основанной на МКЭ и используемой для анализа поведения конструкций в процессе эксплуатации [26].

С целью оптимизации расчетной модели конструкция выполнена без контргаек, предотвращающих отвинчивание упорных винтов. Их функция заменена использованием элемента жесткой заделки, имитирующего резьбовые соединения. Таким же образом произведена замена крепежных элементов (винтов), соединяющих шпонки и боковую крышку с валом ковочных вальцов.

Разработка и моделирование технологического процесса вальцовки профилированной заготовки под штамповку тонкополотной поковки гаечного ключа [27-29] предоставляет в качестве результатов исходные данные для дальнейшего исследования секторов-штампов из теплостойкой штамповой стали 5ХНМ ГОСТ 5950-2000 [30], зарубежным аналогом которой является сталь X38CrMoV5-3 [31], и крепежной оснастки для установки и фиксации секторов – легированная конструкционная сталь 40Х ГОСТ 4543-2016 [32].

Горячее деформирование предполагает использование соответствующих режимов нагрева: начальная температура исходной заготовки 1250 °С и секторов-штампов 250 °С. В момент возникновения наибольшей нагрузки в результате теплопередачи максимальная температура на участке контакта секторов с заготовкой ($T_{\text{сек.штг}}$) при вальцовке в овальном ручье достигает 477 °С; круглом ручье – 503 °С; в квадратном ручье – 333 °С.

В ходе моделирования процесса вальцовки в программном комплексе *DEFORM-3D* [33] получены графики зависимости силы от времени вальцовки (рис. 1), анализом которых установлено, что при вальцовке в овальном калибре максимальная сила на верхнем валу равна 105 кН, на нижнем валу 100 кН (рис. 1, а). В калибрах круглого сечения (64,5 кН на обоих валах) и в калибрах квадратного сечения (40,5 кН на обоих валах) (рис. 1, б, в). Силовые параметры имеют разные значения вследствие изменения площади пятна контакта заготовки с секторами-штампами, имеющих разную форму калибров.

Также компьютерное моделирование в *DEFORM – 3D* дает возможность определить площадь пятна контакта секторов с заготовкой ($S_{\text{п.к.}}$) в момент возникновения максимальной нагрузки в процессе формоизменения: при обработке в овальном ручье $S_{\text{п.к.}}=885 \text{ мм}^2$; в круглом ручье $S_{\text{п.к.}}= 632 \text{ мм}^2$; в квадратном ручье $S_{\text{п.к.}} - 557 \text{ мм}^2$.

В результате действия нагрузки 105 кН на площадь контакта инструмента с заготовкой в процессе вальцовки в овальном ручье возникает давление 188 МПа. При этом эквивалентное напряжение, равное $\approx 92,4 \text{ МПа}$, возникающее в секторе-штампе и крепежной оснастке, не превышает предела текучести материала (рис. 2, а), из которого они изготовлены. Наиболее уязвимые участки расположены в местах приложения нагрузки, а также в зонах контакта исследуемого сектора-штампа с кольцевым замком системы крепления на валах ковочных вальцов через шпонку.

Результаты анализа конструкции на эквивалентные деформации демонстрируют максимальные значения для овального калибра (рис. 2, б), равные $\epsilon_i=3,4 \times 10^{-3}$ и обнаруженные в зоне контакта сектора с заготовкой.

Исследование на прочность анализом статических нагрузок показало, что минимальный коэффициент запаса равен 2,8 (рис. 2, в), что по значению больше единицы – границы, ниже которой

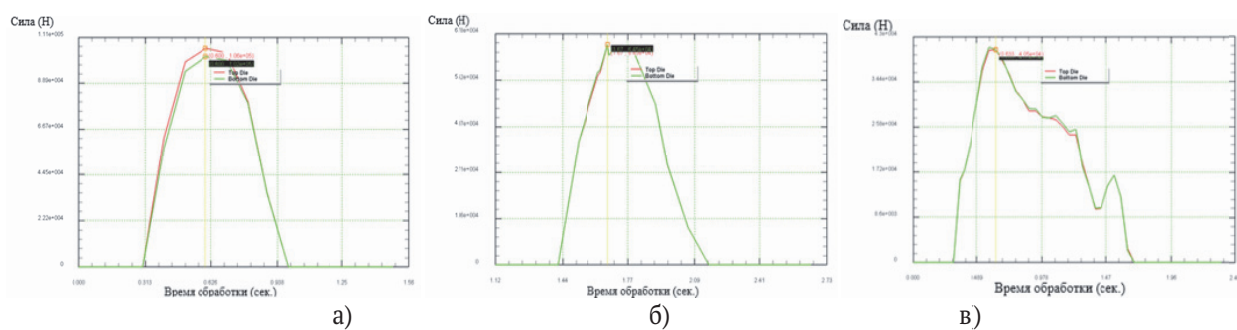


Рис. 1. Графики зависимости силы деформирования от времени вальцовки в калибрах разной формы: а – овальном; б – круглом; в – квадратном

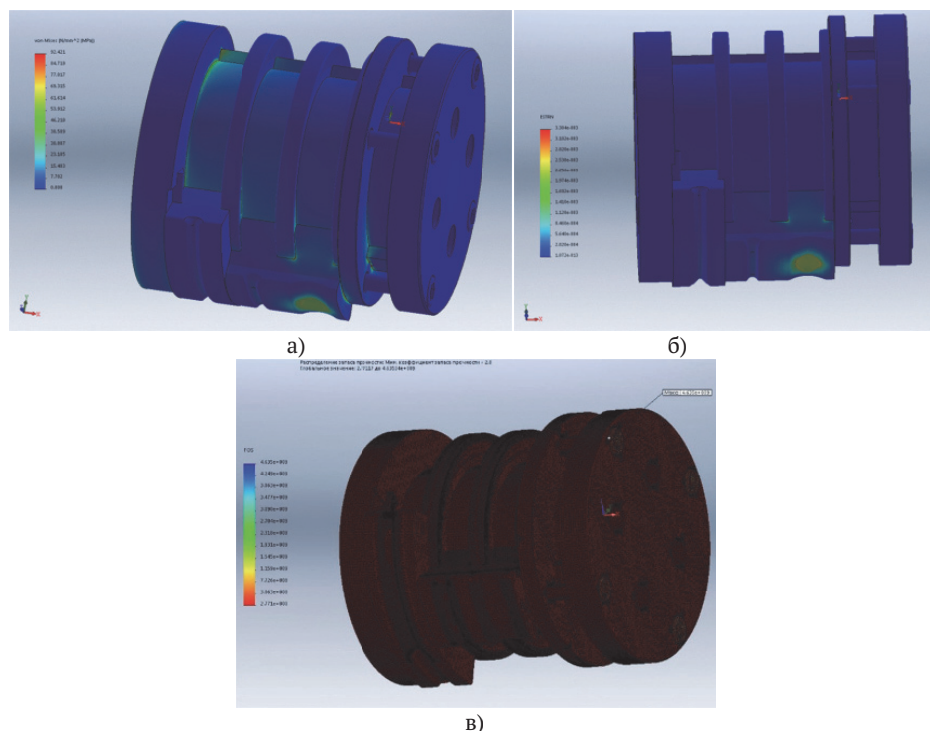


Рис. 2. Анализ НДС и прочности конструкции при воздействии максимальной нагрузки на овалный ручей:

а – эквивалентные напряжения; б – эквивалентные деформации; в – коэффициент запаса прочности

конструкция может быть переведена в предельное состояние, соответствующее переходу к пластической деформации в локальных зонах. Максимальный коэффициент запаса прочности имеют крепежные элементы (упорные винты) – $3,70 \times 10^{10}$.

В процессе профилирования заготовки в круглом ручье в момент наибольшей нагрузки 64,5 кН на площадь контакта инструмента с поковкой возникает давление 208 МПа, при этом, в зоне взаимодействия сектора-штампа с поковкой зафиксировано максимальное эквивалентное напряжение, величина которого составляет ≈ 105 МПа (рис. 3, а).

В результате исследования конструкции на эквивалентные деформации установлено, что при формоизменении поковки в круглом ручье (рис. 3, б) максимальное значение интенсивности деформации достигает $3,85 \times 10^{-3}$.

Оценка прочности конструкции показала, что коэффициент запаса составляет 8,5, что много больше границы перехода к пластической деформации (рис. 3, в). Кроме того, наибольший коэффициент запаса прочности имеют упорные винты, сопряженные с торцевой крышкой и прижимным кольцом, который достигает значения $1,7 \times 10^{10}$.

В процессе вальцовки в квадратном ручье приложение нагрузки величиной 40,5 кН к пятну контакта между инструментом и заготовкой приводит к возникновению давления в 218 МПа. При этом максимальное эквивалентное напряжение, достигающее значения 123,2 МПа, также не превышает предела текучести материалов, из которых изготовлены сектор-штамп и крепежная оснастка (рис. 4, а).

Максимальная эквивалентная деформация, достигающая значения $4,16 \times 10^{-3}$, наблюдается преимущественно в зоне контакта сектора с заготовкой (рис. 4, б).

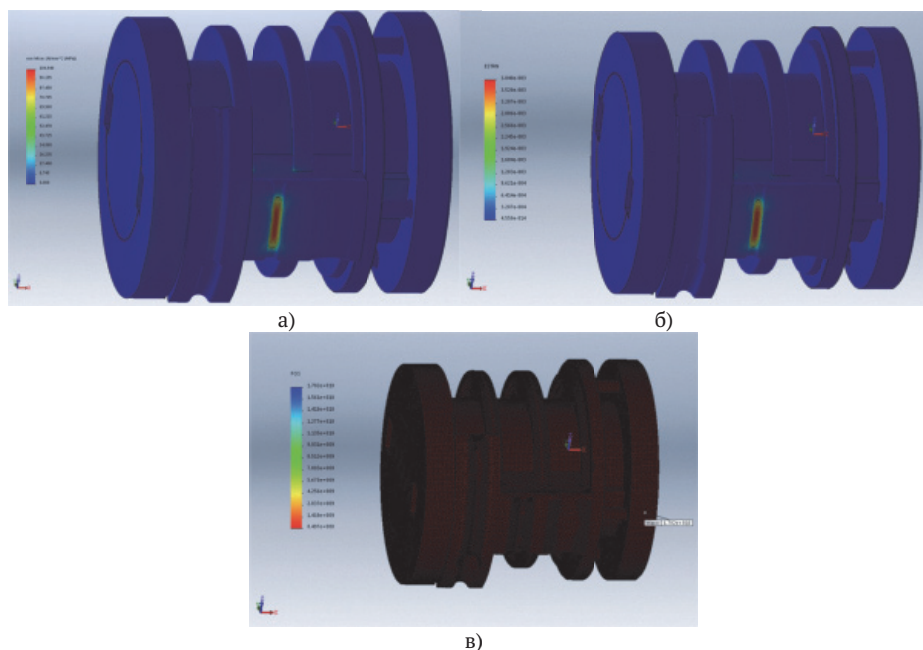


Рис. 3. Анализ НДС и прочности конструкции при воздействии максимальной нагрузки на круглый ручей:

а – эквивалентные напряжения; б – эквивалентные деформации; в – коэффициент запаса прочности

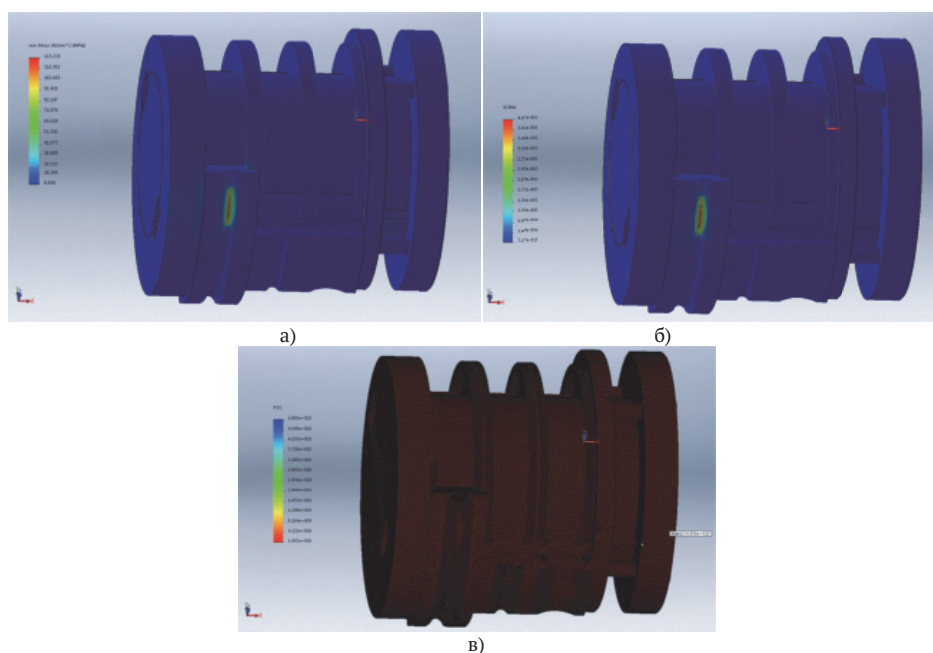


Рис. 4. Анализ НДС и прочности конструкции при воздействии максимальной нагрузки на квадратный ручей:

а – эквивалентные напряжения; б – эквивалентные деформации; в – коэффициент запаса прочности

В результате исследования конструкции на прочность установлено, что минимальный коэффициент запаса прочности равен 6,87 (рис. 4, в), что выше границы перехода в предельное состояние с возникновением пластической деформации в локальных зонах. Максимальный коэффициент локализован в области элементов фиксации и составляет 49,6.

Исходя из результатов проведения численного анализа МКЭ в программном модуле *Solid Works Simulation*, установлены следующие закономерности. При наличии трех пар секторов-штампов максимальные значения эквивалентных напряжений и эквивалентных деформаций в момент формоизменения заготовки наблюдаются в секторах с квадратной формой калибра. Это связано с возникновением наибольшего давления на пятне контакта инструмента с заготовкой, несмотря на относительно невысокий показатель приложенной силы 40,5 кН. Оценка прочности указывает на значительный коэффициент запаса, при этом самое высокое значение исследуемой характеристики наблюдается у упорных винтов.

Анализ результатов исследования вальцовки в овальном ручье говорит о наличии невысокого коэффициента запаса прочности (2,8), по сравнению с другими формами калибров секторов-штампов, но достаточного для обеспечения надежной работы конструкции. Вероятно, это связано с наибольшей площадью пятна контакта, по которой распределяется нагрузка на инструмент, и наиболее дальним расположением сектора-штампа от станины ковочных вальцов.

Наибольший коэффициент запаса прочности (8,5) наблюдается у сектора-штампа с калибром круглого сечения.

Методика построения аналитической модели включает следующие этапы:

- выбор аппроксимационной зависимости модуля упругости стали X38CrMoV5-3 от температуры;
- расчёт нормального контактного напряжения с учётом изменения модуля упругости материала при рабочей нагрузке на сектор-штамп;
- определение расчетного коэффициента концентрации напряжений на основе данных МКЭ;
- оптимизация коэффициента концентрации полным факторным экспериментом (ПФЭ);
- проведение верификации модели с использованием критерия Фишера.

Для подготовки и апробации модели используются результаты МКЭ-анализа в программных комплексах *DEFORM-3D* и *Solid Works*. Для каждого из трех калибров задаются рассчитанные значения нагрузок, площадей контакта, температуры штампа и максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу.

Температурная зависимость модуля упругости аппроксимирована квадратичным полиномиальным законом, основу которого составили экспериментальные данные из исследований инструментальных сталей для штампов ГОШ [34-36]. Для стали X38CrMoV5-3 в диапазоне 20 – 600 °С модуль упругости рассчитывается по зависимости:

$$E(T_{\text{сек.шт}}) = E_0[1 - a_1(T_{\text{сек.шт}} - 20) + a_2(T_{\text{сек.шт}} - 20)^2], \quad (1)$$

где $E_0 = 215000$ МПа – модуль упругости материала при $T=20$ °С, $a_1=1,2 \times 10^{-4} K^{-1}$ – коэффициент линейного расширения, $a_2=1 \times 10^{-7} K^{-2}$ – коэффициент квадратичного члена, который учитывает нелинейную зависимость, характерную для диапазона 20 – 600 °С.

Тогда для $T = 477$ °С, $\Delta T = 457$ °С

$$E(477) = 215 \times 10^9 [1 - 1,2 \times 10^{-4} \times 457 + 1 \times 10^{-7} \times 457^2] = 2,080 \times 10^5 \text{ МПа.}$$

Из этого следует, что при 477 °С модуль упругости снижается на 3,4 % относительно E_0 .

$$E(503) = 2,075 \times 10^5 \text{ МПа; } E(333) = 2,091 \times 10^5 \text{ МПа.}$$

Такая аппроксимация позволяет более точно учесть нелинейное падение значения модуля упругости при повышении температуры и избежать грубых погрешностей линейных моделей.

Квадратичная модель зависимости модуля упругости от температуры показала высокую точность аппроксимации (ошибка менее 2 % на интервале 20 – 600 °С). Нормальное напряжение в области пятна контакта сектора-штампа и заготовки при пересчете вычислялось как отношение приложенной нагрузки к площади контакта, скорректированное на относительное снижение модуля упругости при текущей температуре инструмента:

$$\sigma(T) = \frac{A}{S_{\text{п.к}}} \times \frac{E(T_{\text{сек.шт}})}{E_0}, \quad (2)$$

где A – приложенная сила, МН; $S_{\text{п.к}}$ – площадь пятна контакта между сектором-штампом и заготовкой, м²; $\frac{E(T_{\text{сек.шт}})}{E_0}$ – поправочный коэффициент, учитывающий снижение упругих характеристик при нагреве.

Введение поправочного коэффициента позволяет привести контактное напряжение к уровню, соответствующему изменённым упругим свойствам материала при данной температуре.

Для овального калибра при значениях $A = 0,105$ МН; $S_{\text{п.к}} = 8,85 \times 10^{-4}$ м²; $T = 477$ °С:

$$\sigma_{\text{н.ов}} = \frac{0,105}{8,85 \cdot 10^{-4}} \times 0,9695 = 1,146 \times 10^8 \text{ Па} \approx 115 \text{ МПа.}$$

Для остальных калибров рассчитываем аналогичным образом.

Круглый калибр:

$$\sigma_{\text{н.кр}} = \frac{0,0645}{6,32 \cdot 10^{-4}} \times 0,9656 \approx 98 \text{ МПа.}$$

Квадратный калибр:

$$\sigma_{\text{н.кв}} = \frac{0,0405}{5,57 \cdot 10^{-4}} \times 0,9722 \approx 70 \text{ МПа.}$$

С целью корректировки базового расчета введен коэффициент концентрации напряжений, определяемый как отношение пикового эквивалентного напряжения, к скорректированному значению нормального напряжения:

$$K_k = \frac{\max \sigma_{\text{ЭКВ}}}{\sigma(T)}, \quad (3)$$

где $\max \sigma_{\text{ЭКВ}}$ – максимальное эквивалентное напряжение в опасной точке модели.

Результаты расчёта:

$$K_k^{OB} = 0,804, K_k^{KP} = 1,071, K_k^{KB} = 1,742.$$

Чем выше значение K_k , тем сильнее локальная концентрация напряжений и тем выше риск усталостного разрушения. Из полученных данных видно, что квадратный калибр отличается наибольшим уровнем концентрации, что соответствует результатам МКЭ.

Проверка математической модели через обратный расчет максимальных эквивалентных напряжений отражает связь коэффициента концентрации с нормальным напряжением и температурным состоянием сектора-штампа.

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ}} = K_k \sigma_H (T_{\text{сек.шт.}}), \quad (4)$$

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ,OB}} = 0,804 \times 114 \approx 92 \text{ МПа};$$

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ,KP}} = 1,071 \times 98 \approx 104 \text{ МПа};$$

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ,KB}} = 1,742 \times 70 \approx 123 \text{ МПа}.$$

Результаты анализа МКЭ в программных комплексах *DEFORM-3D* и *Solid Works* сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры, полученные МКЭ-анализом

Калибр	A, МН	$S_{\text{п.к.}}$, м^2	$T_{\text{сек.-шт.}}$, $^{\circ}\text{C}$	$\max \sigma_{\text{ЭКВ.}}$, МПа	K_k
Овальный	0,105	$8,85 \times 10^{-4}$	477	92	0,804
Круглый	0,0645	$6,32 \times 10^{-4}$	503	104	1,071
Квадратный	0,0405	$5,57 \times 10^{-4}$	333	123	1,742

В результате анализа МКЭ получены значения коэффициента концентрации, отличающиеся по трём калибрам в диапазоне от 0,80 до 1,75. Это связано с различием геометрии и величин локальных пиковых напряжений.

Для количественной оценки связи максимальных эквивалентных напряжений $\max \sigma_{\text{ЭКВ}}$ в опасных сечениях сектора-штампа с ключевыми параметрами проведен развернутый трехфакторный эксперимент с тремя уровнями каждого фактора:

$$T_{\text{сек.шт.}} \in \{333, 477, 503\}, K_k \in \{0,804, 1,071, 1,742\}, A \in \{40,5, 64,5, 105\}.$$

Матрица плана размером $3^3 = 27$ комбинаций обеспечивает сбалансированную выборку всех возможных сочетаний уровней. Каждое значение одного фактора встречается во всех сочетаниях уровней остальных факторов ровно по одному разу, что гарантирует ортогональность плана и равные веса при оценке влияния каждого фактора на отклик и позволяет восстановить полный вид линейной регрессии [37, 38].

Каждый фактор характеризуется тремя уровнями варьирования, чтобы обеспечить равномерность покрытия области планирования. Такое количество уровней позволяет корректно оценивать возможные слабые нелинейности отклика, даже если итоговая модель является линейной.

Введена матрица проектирования $X \in R^{27 \times 4}$ и вектор откликов $y \in R^{27}$:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & K_{k1} & A_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{27} & K_{k27} & A_{27} \end{bmatrix}_{27 \times 4} \quad y = \begin{bmatrix} \sigma_{\max 1} \\ \vdots \\ \sigma_{\max 27} \end{bmatrix}.$$

Каждый столбец матрицы X характеризуется параметром: свободный член (единица), температура T ($^{\circ}\text{C}$), коэффициент концентрации K_k (безразмерный), сила A (МН).

Оценка параметров модели методом наименьших квадратов (МНК):

$$\hat{b} = (X^T X)^{-1} X^T y.$$

Для корректной оценки ковариационной матрицы регрессоры были предварительно центрированы:

$$T_c = T - \bar{T}, T_{kc} = K_k - \bar{K}_k, A_c = A - \bar{A}.$$

Центрирование делает интерпретацию свободного члена удобной ($b_0 = \bar{y}$).

На основании данных таблицы 2, содержащей 27 наблюдений, построена линейная модель зависимости максимальных эквивалентных напряжений $\max \sigma_{\text{ЭКВ}}$ от температуры T , коэффициента концентрации напряжений K_k и силы деформирования A .

Математическая модель описывается в виде:

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ}} = b_0 + b_1 T + b_2 K_k + b_3 A + \varepsilon, \quad (5)$$

где ε – случайная составляющая (остаток), имеющая математическое ожидание $E_{[\varepsilon]} = 0$ и постоянную дисперсию $D_{[\varepsilon]} = \sigma_{\varepsilon}^2$.

Таблица 2. Комбинации для ПФЭ $3^3=27$

№	$T_{\text{сек.-шт.}}, ^\circ\text{C}$	K_k	$A, (\text{МН})$	$\max \sigma_{\text{ЭКВ}}, \text{МПа}$
1	333	0,803	0,0405	35,7
2	333	0,803	0,0645	56,9
3	333	0,803	0,1050	92,6
4	333	1,056	0,0405	47,2
5	333	1,056	0,0645	75,1
6	333	1,056	0,1050	122,4
7	333	1,740	0,0405	77,1
8	333	1,740	0,0645	122,8
9	333	1,740	0,1050	200
10	477	0,803	0,0405	36,7
11	477	0,803	0,0645	58,4
12	477	0,803	0,1050	95,1
13	477	1,056	0,0405	48,5
14	477	1,056	0,0645	77,2
15	477	1,056	0,1050	125,7
16	477	1,740	0,0405	79,5
17	477	1,740	0,0645	126,6
18	477	1,740	0,1050	206,1
19	503	0,803	0,0405	36,8
20	503	0,803	0,0645	58,5
21	503	0,803	0,1050	95,2
22	503	1,056	0,0405	48,6
23	503	1,056	0,0645	77,3
24	503	1,056	0,1050	125,8
25	503	1,740	0,0405	79,6
26	503	1,740	0,0645	126,7
27	503	1,740	0,1050	206,2

Матрица наблюдений:

$$y = Xb + \varepsilon,$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & K_{k1} & A_1 \\ 1 & T_2 & K_{k2} & A_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{27} & K_{k27} & A_{27} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}.$$

Используя метод наименьших квадратов, получаем:

$$(X^T X)b = X^T y, \quad \hat{b} = (X^T X)^{-1} X^T y.$$

Построение регрессионной модели:

$$(X^T X)_{ij} = \sum_{k=1}^{27} x_{ki} x_{kj},$$

где

$$\sum 1 = 27, \sum T = 11817, \sum A = 1,89, \sum TK_k = 14176.$$

Суммы из полного факторного плана равны:

$$(X^T X) = \begin{pmatrix} 27 & 11817 & 32,39 & 1,89 \\ 11817 & 5,322,843 & 14,176 & 827,2 \\ 32,39 & 14,176 & 43,09 & 2,27 \\ 1,89 & 827,2 & 2,27 & 0,151 \end{pmatrix}.$$

Вектор $X^T y$ (суммы пар столбец $X \times y$) равен:

$$X^T y = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{27} y_i \\ \sum_{i=1}^{27} T_i y_i \\ \sum_{i=1}^{27} K_{k,i} y_i \\ \sum_{i=1}^{27} F_i y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2538 \\ 1113500 \\ 3375 \\ 203,4 \end{pmatrix}.$$

Решение системы уравнений МНК:

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1,903 & -0,0029 & -0,284 & -3,659 \\ -0,0029 & 0,0000066 & 0 & 0 \\ -0,284 & 0 & 0,236 & 0 \\ -3,659 & 0 & 0 & 52,28 \end{pmatrix}.$$

Используется стандартизация (*z-score*), тогда:

$$b_0 = -100,97; b_1 = 0,0170; b_2 = 77,97; b_3 = 1343.$$

Итоговая оценка:

$$\max \hat{\sigma}_{\text{эKB}} = -100,97 + 0,0170T + 77,97K_k + 1343F + \varepsilon.$$

Суммы квадратов и статистическая оценка модели.

Прогнозируемые значения:

$$\hat{y}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 T_i + \hat{b}_2 K_{k,i} + \hat{b}_3 F_i.$$

Общая сумма квадратов:

$$SST = \sum_{i=1}^{27} (y_i - \bar{y})^2 = 63981.$$

Сумма квадратов ошибок:

$$SSE = \sum_{i=1}^{27} (y_i - \hat{y}_i)^2 = 3736.$$

Сумма квадратов регрессии:

$$SSR = SST - SSE = 60245.$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{60245}{63981} \approx 0,9416.$$

Средние квадраты:

$$MSR = \frac{SSR}{p-1} = \frac{60245}{3} \approx 20081.$$

Среднеквадратичная ошибка *MSE* оценивалась как остаточная вариация при одном наблюдении на комбинацию факторов.

$$MSE = \frac{SSE}{n-p} = \frac{3736}{23} \approx 162,44.$$

Итого: $SST = 63981$; $SSE = 3736$; $SSR = 60245$; $R^2 = 0,9416$; $MSR = 20082$; $MSE = 162,4$.

F – статистика (критерий Фишера) [39]:

$F = \frac{MSR}{MSE}$ – отношение сигнала (что модель объясняет) к шуму (необъяснённое). Если F большое,

значит объяснённая часть явно превышает шум – модель полезна. – p -value для F это вероятность получить такое большое значение F , если на самом деле ничего не объясняется, т. е. все коэффициенты T , K_k , A равны нулю.

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{20081}{162,44} \approx 123,6 \gg F_{3,23;0,05} = 3,07;$$

$$F = 123,6 \gg 3,07 \rightarrow p < 10^{-13}.$$

Значение p мало ($p < 10^{-13}$), следовательно отклоняется нулевая гипотеза о том, что все коэффициенты равны нулю, и модель в целом значима.

Ковариационная матрица оценок выражается формулой:

$$\widehat{Var}(\hat{b}) = MSE \cdot (X^T X)^{-1}. \quad (6)$$

Для b_0 :

$$Var(b_0) = 162,44 \times 1,9025573326 = 308;$$

$$SE(b_0) = \sqrt{308,99722213} = 17,58.$$

Для b_1 :

$$\begin{aligned} \text{Var}(b_1) &= 162,44 \times 6,6245831218 \times 10^{-6} = 0,0010750717445; \\ \text{SE}(b_1) &= \sqrt{0,0010750717445} = 0,0328. \end{aligned}$$

Для b_2 :

$$\begin{aligned} \text{Var}(b_2) &= 162,44 \times 0,236434445939 = 38,39111244; \\ \text{SE}(b_2) &= \sqrt{38,39111244} = 6,20. \end{aligned}$$

Для b_3 :

$$\begin{aligned} \text{Var}(b_3) &= 162,44 \times 52,2752816037 = 8491,579; \\ \text{SE}(b_3) &= \sqrt{8491,579} = 92,15. \end{aligned}$$

Диагональ матрицы даёт оценки дисперсий коэффициентов, а корни диагонали – стандартные ошибки:

$$\text{SE}(\hat{b}) = (17,58, 0,0328, 6,20, 92,15).$$

На основе полученных среднеквадратичных ошибок при определении каждого коэффициента (SE) рассчитываются t – статистики критерия Стьюдента (МНК):

$$t_i = \frac{\hat{b}_i}{\text{SE}(\hat{b}_i)} \approx (-5,74; 0,52; 12,58; 14,57).$$

Проведенный регрессионный анализ показал, что коэффициенты b_2 и b_3 обладают высокой статистической значимостью при уровне доверия 95 %, что подтверждается большими по модулю значениями t – статистики и малыми $p \ll 0,05$. Это говорит о существенном влиянии данных факторов на результирующие эквивалентные напряжения. Коэффициент b_1 не является статистически значимым, так как его значение t -статистики мало (0,52).

Диагностика Шапиро – Уилка (проверка нормальности распределения остатков $e_i = y_i - \hat{y}_i$).

Нулевая гипотеза H_0 заключается в том, что остатки подчиняются нормальному распределению $N(0, \sigma^2)$. Альтернатива H_1 – распределение отличное от нормального.

Вектор остатков:

$$e = (e_1, e_2, \dots, e_n), n = 27.$$

Сортировка по возрастанию:

$$e_{(1)} \leq e_{(2)} \leq \dots \leq e_{(n)}.$$

Коэффициенты a_i заранее табулированы (в зависимости от числа наблюдений n) и выражаются через математические ожидания и дисперсии порядковых статистик стандартного нормального распределения:

$$a = \frac{m^T V^{-1}}{\sqrt{m^T V^{-1} V^{-1} m}}, \quad (7)$$

где $m = E[\varepsilon_{(i)}]$ – средние значения порядковых статистик для $N(0,1)$, V – ковариационная матрица статистик.

Статистика критерия Шапиро – Уилка:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i \varepsilon_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}, \quad (8)$$

где коэффициенты a_i – фиксированные числа (зависят от n) и получаются из ожидаемых значений упорядоченных нормальных размеров; $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение остатков.

Для нормальных остатков W близко к 1. При существенном отклонении $W < 1$. Критическое значение определяется таблично или по p – значению.

$W = 0,943$, $p = 0,145$ – нормальность остатков не отвергается.

Проверка зависимости дисперсии ошибок от значения регрессоров (гетероскедастичности) методом Броуша – Пагана:

$$u_i = e_i^2. \quad (9)$$

Выводится вспомогательная регрессия:

$$u_i = \alpha_0 + \alpha_1 T_i + \alpha_2 K_{k,i} + \alpha_3 A_i + v_i; \quad (10)$$

$$LM \text{ (Lagrange Multiplier)} = n \cdot R_{\text{всп}}^2, \quad (11)$$

где $R_{\text{всп}}^2$ – коэффициент детерминации этой вспомогательной регрессии. При справедливости H_0 величина LM имеет распределение χ^2 с k степенями свободы ($k = 3$).

Для 27 наблюдений:

$$R_{\text{всп}}^2 = 0,009; n = 27;$$

$$LM = 27 \times 0,009 = 0,243.$$

Критическое значение $\chi_{(3;0,05)}^2 = 7,81$.

Так как $0,243 < 7,81$, гипотеза H_0 не отвергается $p = 0,97$. Для критерия Броуша – Пагана вспомогательная регрессия дала $\approx 0,009$, откуда $LM = 27 \times 0,009 = 0,243$. При $\chi^2(3)$ это соответствует $p \approx 0,97$, следовательно, гетероскедастичность отсутствует.

Тест Уайта (альтернативная проверка гомоскедастичности и нелинейности) проверяет не только зависимость дисперсии от факторов, но и от их комбинаций (например, $T^2, K_k^2, A^2, T \times K_k$ и т. д.).

Если Броуш – Паган тестирует только линейную зависимость регрессоров, то Уайт – тест – общую форму гетероскедастичности, включающую квадратичные и перекрёстные члены.

Исходные данные (квадраты остатков):

$$u_i = e_i^2.$$

Вспомогательная регрессия Уайта:

$$u_i = \alpha_0 + \alpha_1 T_i + \alpha_2 K_{k,i} + \alpha_3 A_i + \alpha_4 T_i^2 + \alpha_5 K_{k,i}^2 + \alpha_6 A_i^2 + \alpha_7 T_i K_{k,i} + \alpha_8 T_i A_i + \alpha_9 K_{k,i} A_i + v_i. \quad (12)$$

Статистика LM (тест множителей Лагранжа):

$$LM = n \cdot R_{\text{всп,Уайт}}^2.$$

При справедливости нулевой гипотезы H_0 , статистика LM асимптотически распределена по χ^2 распределению с числом степеней свободы, равным количеству объясняющих факторов во вспомогательной модели ($k = 9$).

$$R_{\text{всп,Уайт}}^2 = 0,030; n = 27; LM = 27 \times 0,030 = 0,81; \chi_{(9;0,05)}^2 = 16,9; p = 0,999.$$

Так как $p=0,999$ – нулевая гипотеза о гомоскедастичности не отвергается, и существенных признаков нелинейности дисперсии остатков не выявлено. Таким образом, модель сохраняет устойчивость, и применение робастных оценок будет являться факультативной проверкой:

$$\widehat{\text{Var}}_{\text{РБ}}(\widehat{b}) = (X^T X)^{-1} (X^T D X) (X^T X)^{-1}; D = \left(\frac{e_i^2}{(1-h_{ii})^2} \right), \quad (13)$$

где h_{ii} – диагональные элементы матрицы проекции $H = (X^T X)^{-1} X^T$, D – диагональная матрица, e_i^2 – остатки.

$$SE_{\text{РБ}} = (22,07; 0,0376; 8,66; 128,3)..$$

Результаты диагностики сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Итоговые результаты диагностики

Тест	Проверка	Нулевая гипотеза	Статистика	p – значение	Вывод
Шапиро – Уилк	Нормальность остатков	$e_i \sim N(0, \sigma^2)$	$W = 0,943$	0,145	Нормальность не отвергается
Броуш – Паган	Гомоскедастичность (линейная форма)	Дисперсия постоянна	$LM = 0,243$	0,97	Гомоскедастичность отсутствует
Уайт	Гомоскедастичность (нелинейная форма)	Дисперсия постоянна	$LM = 0,81$	0,999	Гомоскедастичность отсутствует
РБ (робастная ковариация)	Робастная коррекция	–	–	–	Учитывает отклонения

Анализ полученной регрессионной зависимости показал, что повышение температуры T на 1°C приводит к увеличению $\text{max}\sigma_{\text{экв}}$ в среднем на $+0,017\text{МПа}$. Рост коэффициента концентрации напряжений K_k на единицу повышает напряжение на 78МПа , а на каждый $0,1\text{МН}$ возрастания силы деформирования A приходится $+13,4\text{МПа}$.

Таким образом, итоговая регрессионная модель имеет вид:

$$\text{max}\widehat{\sigma}_{\text{ЭКВ}} = -100,97 + 0,0170T + 77,97K_k + 1343A + \varepsilon.$$

Модель объясняет $94,16\%$ дисперсии отклика ($R^2=0,9416$), что свидетельствует об адекватности модели.

Наиболее статически значимым является коэффициент концентрации напряжений K_k .

Средняя абсолютная ошибка (MAE) составила менее 5 % от среднего значения $\max\sigma_{\text{экв}}$.

Оценка усталостной долговечности C производилась на основе обобщенной модели Баскина [40-42]. Температурная поправка параметра осуществлялась по эмпирической зависимости, известной из технической литературы [35] при высокотемпературных испытаниях инструментальных сталей. Приведенные в работе экспериментальные данные стали X38CrMoV5-3 относятся к области малоциклового и термомеханического усталости и представлены в деформационной постановке, где характерные значения долговечности составляют $10^2 - 10^4$ циклов при амплитудах деформации порядка 0,4 – 1 %. Произведена оценка стойкости инструмента в области высокоциклового усталости на основе напряженной модели Баскина, что соответствует условиям работы инструмента. Таким образом, сопоставление носит качественный характер и подтверждает корректность тенденций изменения ресурса при снижении амплитуды нагружения [43-45].

Усталостная долговечность интерпретируется как эффективная усталостная характеристика материала при циклическом нагружении, определяющая начальный уровень сопротивления накоплению усталостных повреждений при экстремальном нагружении. С учетом корректировки на рабочую температуру сектора-штампа определяется по формуле:

$$C(T_{\text{сек.шт}}) = C_0 [1 - \gamma(T_{\text{сек.шт}} - 20)], \quad (14)$$

где $C_0 = 600$ МПа – номинальная усталостная константа при базовой температуре; $\gamma = 5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент, характеризующий скорость снижения усталостной прочности материала с ростом температуры штампа.

Для овального калибра: $C(477) = 463$ МПа.

Для круглого калибра: $C(503) = 455$ МПа.

Для квадратного калибра: $C(333) = 506$ МПа.

Ресурс работы калибров определяется по формуле:

$$N = \left(\frac{C(T_{\text{сек.шт}})}{\max\sigma_{\text{экв}}} \right)^{1/b}, \quad (15)$$

где $b = 0,1$ – экспоненциальный показатель усталости (безразмерный).

Тогда предельное количество циклов наработки для каждого из калибров:

$$N_{\text{ов}} = 1,28 \times 10^8; N_{\text{кр}} = 3,65 \times 10^7; N_{\text{кв}} = 5,90 \times 10^6.$$

Исходя из полученных данных при сравнении с результатами МКЭ-анализа можно констатировать, что из-за наибольших показателей эквивалентных деформаций и эквивалентных напряжений квадратный калибр имеет наименьший ресурс работы; несмотря на наименьший показатель коэффициента запаса прочности секторы-штампы с овальным калибром обладают наибольшим ресурсом работы.

ВЫВОДЫ

Совершенствование аналитической модели достигнуто за счёт учёта температурного влияния на упругие свойства материала инструмента. Использование уточненной зависимости модуля упругости $E(T)$, аппроксимированной полиномом второй степени, позволило минимизировать расхождение расчётных напряжений с данными компьютерного моделирования при температурах выше 400 °C;

Разработанная методика позволит конструкторским и технологическим службам кузнечных цехов, наряду с моделированием процессов деформирования, оперативно оценивать ресурс работы инструментов по представленным регрессионным моделям и вносить изменения в геометрию калибров, энергосиловые и температурные режимы вальцовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосенушкин, Е.Н. Обоснование и выбор температурных интервалов для варианта технологии пластического деформирования / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, Д.С. Гусев, С.А. Рогулин, А.С. Пономарева // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 7. – С. 592-598.
2. Патент № 2781825С1 РФ, МПК В21К5/16. Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием / Е.Н. Сосенушкин, А.Е. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, Д.С. Гусев, С.А. Рогулин, Н.Г. Хохлова ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Оpubл. 18.10.2022, бюл. № 29.
3. Мартюгин, А.В. Совершенствование метода проектирования технологических процессов горячей объёмной штамповки коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами / А.В. Мартюгин, И.М. Володин, А.И. Володин, Г.Ф. Биктимирова // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. – Вып. 6. – С. 364-371.

4. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. 2е изд., перераб. и доп./ Под общ. ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 2010. – 717 с.
5. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. 2е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 2010. – 720 с.
6. Живов, Л.И. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов/ Л.И. Живов, А.Г. Овчинников, Е.Н. Склячков / Под ред. Л.И. Живова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 560 с.
7. Ильюшин, А.А. Труды (1946-1966). Т.2. Пластичность / Составители Е.А. Ильюшина, М.Р. Короткина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 430 с.
8. Беляева, И.А. Математическое моделирование процессов ОМД: учеб. пособие/ И.А. Беляева. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 84 с.
9. Сосенушкин, Е.Н. К вопросу о моделировании напряженно-деформированного состояния при обработке материалов давлением / Е.Н. Сосенушкин, В.А. Кадымов, Е.А. Яновская, А.А. Татаринцев, А.Е. Сосенушкин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 11. – Ч.1. С. 82-100.
10. Сосенушкин, Е.Н. Математическая модель напряженно-деформированного состояния и силовых параметров гибки концевых участков швеллеров, используемых в вагоностроении/ Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.С. Пономарева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26. – № 2. С. 131-143.
11. Власов, А.В. Конечно-элементное моделирование технологических процессов ковки и объемной штамповки: учебное пособие / А.В. Власов и др.; под ред. А.В. Власова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.
12. Zamaraeva, Yu. V. Experience in the application of simulation of hot forging in production conditions at the KUMW JSC/ Yu. V. Zamaraeva, L. I. Knysh, E. M. Gaisin // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2023. Iss. 5. P. 69–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.5.069-082.
13. Романенко, В.П. Моделирование технологического процесса формовки заготовок для железнодорожного колеса методом конечных элементов / В.П. Романенко, А.А. Золотарев// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – №5. – С. 63-66.
14. Бабенко, В. А. Объемная штамповка. Атлас схем и типовых конструкций штампов: Уч. пособие для машиностроительных вузов / В. А. Бабенко, В. В. Бойцов, Ю. П. Волик. – 2-3 изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 104 с.
15. Карпайтис, Е.П. Проектирование инструментов для горячей вальцовки заготовок/ Е.П. Карпайтис, П.И. Золотухин, И.М. Володин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т.2. – № 1(15). С. 76-79.
16. Zbigniew, P. Overview of the research on roll forging processes / P. Zbigniew, T. Arkadiusz // Advances in Science and Technology Research Journal / Volume 11, Issue 2, June 2017, p. 72–86 DOI: 10.12913/22998624/70645.
17. Атрошенко, А.П. Технология горячей вальцовки / А. П. Атрошенко. – М.: Машиностроение, 1969. – 176 с.
18. Рудаков, Б.П. Ковка и штамповка на специализированном оборудовании / Б.П. Рудаков, А.Н. Силичев, Е.В. Степанов и др. Под общ. Ред. П.В. Камнева и А.П. Атрошенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинигр. отд-ние, 1982. – 96 с.
19. Титов, Ю.А. Проектирование штампов для горячей объемной штамповки: учебное пособие / Ю. А.Титов, А. Ю. Титов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 116 с.
20. Патент № 2827191 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Рабочий вал ковочных вальцов/ С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская, А. Е. Сосенушкин. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Оpubл. 23.09.2024. Бюл. № 27.
21. Патент № 2827189 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Рабочий вал ковочных вальцов/ Е. Н. Сосенушкин, С. А. Рогулин, А. Е. Сосенушкин, Е. А. Яновская, В. А. Кадымов, М. В. Шарыкин. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Оpubл. 23.09.2024. Бюл. № 27.
22. Патент № 2828456 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Рабочий вал ковочных вальцов/ Е. Н. Сосенушкин, С. А. Рогулин, А. Е. Сосенушкин, Е. А. Яновская, В. А. Кадымов, М.В. Шарыкин. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Оpubл. 14.10.2024. Бюл. № 29.
23. Патент № 2828337 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа/ Е. Н. Сосенушкин, С. А. Рогулин, А. Е. Сосенушкин, Е. А. Яновская, А. С. Пономарева. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Оpubл. 09.10.2024. Бюл. № 28.
24. Патент № 2827967 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа/ С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин, А. Е. Сосенушкин, Е. А. Яновская, А. С. Пономарева, Д. С. Гусев. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Оpubл. 14.10.2024. Бюл. № 28.
25. Патент № 2828456 РФ МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01) Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа/ Е. Н. Сосенушкин, С. А. Рогулин, А.Е. Сосенушкин, Е. А. Яновская, А. С. Пономарева. ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН». Оpubл. 14.10.2024. Бюл. № 29.
26. Сотников, Н.Н. Основы моделирования в SolidWorks/ Н. Н. Сотников, Д. М. Козар. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2013. – 129 с.
27. Рогулин, С.А. Исследование технологических параметров операций горячего деформирования поковки типа «Гаечный ключ»/ С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 5. – С. 376-383. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-376-377.
28. Сосенушкин, Е.Н. Моделирование процесса вальцовки профилированной заготовки под штамповку поковки гаечного ключа/ Е. Н. Сосенушкин, С. А. Рогулин, Д. С. Гусев// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2023. – № 12. – С. 36-42.
29. Рогулин, С.А. Рационализация вальцовки моделированием параметров заготовки под штамповку поковки детали «Гаечный ключ» как способ ресурсосбережения / С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская //

- Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 147-154. – DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-147-154.
30. Зубченко, А. С. Марочник сталей и сплавов/ А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. – М.: Машиностроение. 2003. – 784 с.
 31. Европейская металлургическая компания. Сталь X38CrMoV5-3 - 1.2367. – https://emk24.ru/wiki/vidy_stalei/x38cmov5_3_1_2367_505376/?ysclid=mj1av6h7xe804682911. (дата обращения 11.12.2025).
 32. ГОСТ 4543–2016 Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. – М.: Стандартинформ. 2019. – 50 с.
 33. Паршин, В. С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D/ В. С. Паршин, А.П. Карамышев, И. И. Некрасов, А. И. Пугин и др.: уч. пособ. Екатеринбург: УрФУ. 2010. 265 с.
 34. Shigley, J. E., Mechanical Engineering Design/ J. E. Shigley, C. R. Mischke, R. G. Budynas. McGraw-Hill, 2011. 1072 с.
 35. NIST Technical Note 1907. Temperature Dependence of Elastic Moduli of Steels. 2015. 125 с.
 36. Ювиналл, Р. К. Основы проектирования машинных компонентов/ Р. К. Ювиналл, К. М. Маршек. – М.: Машиностроение, 2006. – 816 с.
 37. Монтгомери, Д. К. Планирование экспериментов и анализ данных / Д. К. Монтгомери. – М.: Статистика, 2019. – 592 с.
 38. Куковинец, А.В. Полный факторный эксперимент для исследования фрагментарного метода обнаружения границ объектов на цифровом изображении/ А. В. Куковинец// Colloquium-journal. Technical science, 52(54), 2020. С. 12-15. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-11210.
 39. Шуленин, В.П. Изучение свойств ранговых аналогов F-критерия Фишера при отклонениях от Гауссовской модели дисперсионного анализа// В. П. Шуленин, В. В. Табољжин// Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2008. – № 1(2). С. 87-96.
 40. Баскин, О. Х. Экспоненциальный закон испытаний на выносливость /, О. Х. Баскин // Proc. ASTM. – 1910. – Т. 10. – С. 625-630.
 41. Ни, Ю. Влияние дефектности поверхности образцов титанового сплава ti–10v–2fe–3al на его поведение при испытаниях на высокоцикловую усталость / Ю. Ни, Ч.В. Чжоу // Физика металлов и металловедение. – 2021, – Т. 122, – №10. – С. 1065-1074. – DOI: 10.31857/S0015323021100077.
 42. Никитин, И.С. Мультирежимная модель развития усталостных повреждений// И.С. Никитин, Н.Г. Бурого, А.Б. Журавлев, А.Д. Никитин // Прикладная математика и механика/ 2020, т.84, №5, с. 663-674 DOI: 10.31857/S0032823520050070.
 43. Vlasov A., Elastic-Plastic Thermomechanical Fatigue Analysis of Forging Dies / A. Vlasov, N. Biba, S. Stebunov // Key Engineering Materials Submitted: 2016-02-12 ISSN: 1662-9809, Vol. 716, pp 667-676 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.716.667 (c) 2016 Trans Tech Publications, Switzerland.
 44. Schlayer, M.; Warwas, M.; Seifert, T. A Temperature-Dependent Viscoplasticity Model for the Hot Work Steel X38CrMoV5-3, Including Thermal and Cyclic Softening under Thermomechanical Fatigue Loading. Materials 2023, 16, 994. <https://doi.org/10.3390/ma16030994>.
 45. Schlayer M. Isothermal and thermomechanical low-cycle fatigue of the hot work steel X38CrMoV5-3 with and without averaging heat treatment / M. Schkayer, M. Warwas, K. Hintz, D. Kohler, T. Seifert // International Journal of Fatigue. 2025. Vol. 178. Article 109353. DOI: 10.1016/ijfatigue.2025.109353.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF DIE SECTORS AND THEIR FASTENING SYSTEM ON THE WORKING SHAFTS OF OPEN-TYPE FORGING ROLLS

© 2026 S. A. Rogulin, E. N. Sosenushkin, R. M. Amkhadov, E. A. Yanovskaya

Moscow State Technological University “STANKIN”, Moscow, Russia

The article presents a method for evaluating the performance of tooling for open-type cantilever forging rolls, based on a combination of computer analysis using the finite element method (FEM) and analytical modeling of the stress-strain state (SSS) of sector-stamps. The focus is on building a regression model that describes the relationship between maximum equivalent stresses and temperature values, stress concentration coefficient, and forces acting on the tool during hot rolling in oval, round, and square calibers. Within the proposed approach, a comparison was made between the FEM-calculated data and the results of the analytical approximation using the least squares method (LSM). An assessment of the adequacy of the regression model was carried out according to the main Fisher and Student criteria, as well as the Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan, and White tests. The service life of the sector-dies was estimated based on the determination of fatigue durability using the Baskin model. The developed model allowed for a quantitative assessment of the impact of key factors on the stress levels in the sector-die and to determine which parameters have the most significant influence on the formation of residual stresses. It has been shown that an increase in the deformation force and the stress concentration factor leads to a rise in the maximum equivalent stresses, while changes in temperature within the studied range have little effect.

Keywords: roll-forging, sector-die, caliber, computer modeling, contact patch, stress-strain state, analytical regression model.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-218-232

EDN: DVIFRN

REFERENCES

1. *Sosenushkin, E.N.* Obosnovanie i vybor temperaturnykh intervalov dlya varianta tekhnologii plasticheskogo deformirovaniya/ E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, D.S. Gusev, S.A. Rogulin, A.S. Ponomareva // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki.* – 2024. – Vyp. 7. – S. 592-598.
2. Patent № 2781825C1 RF, MPK B21K5/16. Sposob izgotovleniya gaechnykh klyuchey pla-sticheskim deformirovaniem / E.N. Sosenushkin, A.E. Sosenushkin, V.A. Kadymov, E.A. Yanovskaya, D.S. Gusev, S.A. Rogulin, N.G. Hohlova FGBOU VO «MGTU STANKIN». Opubl. 18.10.2022, byul. № 29.
3. *Martyugin, A.V.* Sovershenstvovanie metoda proektirovaniya tekhnologicheskikh processov goryachej ob»yomnoj shtampovki kolenchatykh valov s neobrabatyvaemymi protivovesami/ A.V. Martyugin, I.M. Volodin, A.I. Volodin, G.F. Biktimirova // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki.* 2020. –Vyp. 6. –S. 364-371.
4. Kovka i shtampovka: spravochnik. V 4 t. T. 1. Materialy i nagrev. Oborudovanie. Kovka. 2e izd., pererab. i dop./ Pod obshch. red. E.I. Semenova. – M.: Mashinostroenie, 2010. –717 s.
5. Kovka i shtampovka: spravochnik. V 4 t. T. 2. Goryachaya ob»emnaya shtampovka. 2e izd., pererab. i dop. / Pod obshch. red. E.I. Semenova. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 720 s.
6. *Zhivov, L.I.* Kuznechno-shtampovnoe oborudovanie: Uchebnik dlya vuzov/ L.I. Zhivov, A.G. Ovchinnikov, E.N. Skladchikov / Pod red. L.I. Zhivova. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006. – 560 s.
7. *Il'yushin, A.A.* Trudy (1946-1966). T.2. Plastichnost' / Sostaviteli E.A. Il'yushina, M.R. Korotkina. – M.: FIZMATLIT, 2004. – 430 s.
8. *Belyaeva, I.A.* Matematicheskoe modelirovanie processov OMD: ucheb. posobie/ I.A. Belyaeva. – Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2019. – 84 s.
9. *Sosenushkin, E.N.* K voprosu o modelirovanii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri obrabotke materialov davleniem / E.N. Sosenushkin, V.A. Kadymov, E.A. Yanovskaya, A.A. Tatarincev, A.E. Sosenushkin // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki.* – 2017. – Vyp. 11. – Ch.1. S. 82-100.
10. *Sosenushkin, E.N.* Matematicheskaya model' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i silovykh parametrov gibki koncevnykh uchastkov shvellerov, ispol'zuemykh v vagonostroenii/ E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.S. Ponomareva // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.* – 2024. – T. 26. – №2. S. 131-143.
11. *Vlasov, A.V.* Konechno-elementnoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov kovki i ob»emnoj shtampovki: uchebnoe posobie / A.V. Vlasov i dr.; pod red. A.V. Vlasova. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2019. – 383 s.
12. *Zamaraeva, Yu. V.* Experience in the application of simulation of hot forging in production con-ditions at the KUMW JSC/ Yu. V. Zamaraeva, L. I. Knysh, E. M. Gaisin // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures.* 2023. Iss. 5. P. 69–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.5.069-082.
13. *Romanenko, V.P.* Modelirovanie tekhnologicheskogo processa formovki zagotovok dlya zheleznodorozhnogo koleasa metodom konechnykh elementov / V.P. Romanenko, A.A. Zolotarev// *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya.* – 2013. – №5. – S. 63-66.
14. *Babenko, V.A.* Ob»emnaya shtampovka. Atlas skhem i tipovykh konstrukcij shtampov: Uch. posobie dlya mashinostroitel'nykh vuzov / V.A. Babenko, V.V. Bojcov, Yu. P. Volik. – 2-3 izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 104 s.
15. *Karpajtis, E.P.* Proektirovanie instrumentov dlya goryachej val'covki zagotovok/ E.P. Karpajtis, P.I. Zolotuhin, I.M. Volodin // *Izvestiya MGTU «MAMI».* – 2013. – T.2. – № 1(15). S. 76-79.
16. *Zbigniew, P.* Overview of the research on roll forging processes / P. Zbigniew, T. Arkadiusz // *Advances in Science and Technology Research Journal / Volume 11, Issue 2, June 2017, p. 72–86 DOI: 10.12913/22998624/70645.*
17. *Atroschenko, A.P.* Tekhnologiya goryachej val'covki / A. P. Atroschenko. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 176 s.
18. *Rudakov, B.P.* Kovka i shtampovka na specializirovannom oborudovanii / B.P. Rudakov, A.N. Silichev, E.V. Stepanov i dr. Pod obshch. Red. P.V. Kamneva i A.P. Atroschenko. – 3-e izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie, Leninigr. otd-nie, 1982. – 96 s.
19. *Titov, Yu.A.* Proektirovanie shtampov dlya goryachej ob»emnoj shtampovki: uchebnoe posobie / Yu. A. Titov, A. Yu. Titov. – Ul'yanovsk: UIGTU, 2012. – 116 s.
20. Patent № 2827191 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Rabochij val kovochnykh val'cov/ S.A. Rogulin, E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.E. Sosenushkin. FGBOU VO «MGTU STANKIN». Opubl. 23.09.2024. Byul. № 27.
21. Patent № 2827189 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Rabochij val kovochnykh val'cov/ E. N. Sosenushkin, S. A. Rogulin, A. E. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya, V. A. Kadymov, M. V. Sharykin. FGBOU VO «MGTU STANKIN». Opubl. 23.09.2024. Byul. № 27.
22. Patent № 2828455 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Rabochij val kovochnykh val'cov/ E. N. Sosenushkin, S. A. Rogulin, A. E. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya, V. A. Kadymov, M.V. Sharykin. FGBOU VO «MGTU STANKIN». Opubl. 14.10.2024. Byul. № 29.
23. Patent № 2828337 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Sposob krepleniya i fiksacii sektorov-shtampov na valah kovochnykh val'cov konsol'nogo tipa/ E. N. Sosenushkin, S. A. Rogulin, A. E. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya, A. S. Ponomareva. FGBOU VO «MGTU STANKIN». Opubl. 09.10.2024. Byul. № 28.
24. Patent № 2827967 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Sposob krepleniya i fiksacii sektorov-shtampov na valah kovochnykh val'cov konsol'nogo tipa/ S. A. Rogulin, E. N. Sosenushkin, A. E. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya, A. S. Ponomareva, D. S. Gusev. FGBOU VO «MGTU STANKIN». Opubl. 14.10.2024. Byul. № 28.
25. Patent № 2828456 RF MPK B21H 8/02 (2006.01) B21J 13/02 (2006.01) Sposob krepleniya i fiksacii sektorov-shtampov na valah kovochnykh val'cov konsol'nogo tipa/ E. N. Sosenushkin, S. A. Rogulin, A.E. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya, A. S. Ponomareva. FGBOU VO «MGTU STANKIN». Opubl. 14.10.2024. Byul. № 29.

26. *Sotnikov, N.N.* Osnovy modelirovaniya v SolidWorks / N. N. Sotnikov, D. M. Kozar. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2013. – 129 s.
27. *Rogulin, S.A.* Issledovanie tekhnologicheskikh parametrov operacij goryachego deformirovaniya pokovki tipa «Gaechnyj klyuch» / S. A. Rogulin, E. N. Sosenushkin // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2023. – Vyp. 5. – S. 376-383. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-376-377.
28. *Sosenushkin, E.N.* Modelirovanie processa val'covki profilirovannoy zagotovki pod shtampovku pokovki gaechnogo klyucha / E. N. Sosenushkin, S. A. Rogulin, D. S. Gusev // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2023. – № 12. – S. 36–42.
29. *Rogulin, S.A.* Racionalizaciya val'covki modelirovaniem parametrov zagotovki pod shtampovku pokovki detali «Gaechnyj klyuch» kak sposob resursosberezheniya / S. A. Rogulin, E. N. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya // Izvestiya Samarского nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2025. – T. 27. – № 1. – S. 147-154. – DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-147-154.
30. *Zubchenko, A.S.* Marochnik stalej i splavov / A. S. Zubchenko, M. M. Koloskov, Yu. V. Kashirskij i dr. – M.: Mashinostroenie. 2003. – 784 s.
31. Evropejskaya metallurgicheskaya kompaniya. Stal' X38CrMoV5-3 - 1.2367. – https://emk24.ru/wiki/vidy_stalei/x38crmov5_3_1_2367_505376/?ysclid=mj1av6h7xe804682911. (data obrashcheniya 11.12.2025).
32. GOST 4543-2016 Metalloprodukcija iz konstrukcionnoj legirovannoj stali. Tekhnicheskie usloviya. M.: Standartinform. 2019. 50 s.
33. *Parshin, V.S.* Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu DEFORM-3D/ V.S. Parshin, A.P. Karamyshev, I. I. Nekrasov, A. I. Pugin i dr.: uch. posob. Ekaterinburg: UrFU. 2010. 265 s.
34. *Shigley, J. E.*, Mechanical Engineering Design/ J. E. Shigley, C. R. Mischke, R. G. Budynas. McGraw-Hill, 2011. 1072 s.
35. NIST Technical Note 1907. Temperature Dependence of Elastic Moduli of Steels. 2015. 125 s.
36. *Yuinall, R. K.* Osnovy proektirovaniya mashinnyh komponentov/ R. K. Yuinall, K. M. Marshek. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 816 s.
37. *Montgomeri, D. K.* Planirovanie eksperimentov i analiz dannyh / D. K. Montgomeri. – M.: Statistika, 2019. – 592 s.
38. *Kukovinec, A.V.* Polnyj faktornyj eksperiment dlya issledovaniya fragmentarnogo metoda obnaruzheniya granic ob'ektov na cifrovom izobrazhenii/ A. V. Kukovinec // Colloquium-journal. Technical science, 52(54), 2020. S. 12-15. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-11210.
39. *Shulenin, V.P.* Izuchenie svojstv rangovyh analogov F-kriteriya Fishera pri otkloneniyah ot Gaussovskoj modeli dispersionnogo analiza// V. P. Shulenin, V. V. Tabol'zhin // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2008. – № 1(2). S. 87-96.
40. *Baskin, O. H.* Eksponencial'nyj zakon ispytaniy na vynoslivost' / O. H. Baskin // Proc. ASTM. – 1910. – T. 10. – S. 625-630.
41. *Ni, Yu.* Vliyanie defektnosti poverhnosti obrazcov titanovogo splava ti-10v-2fe-3al na ego povedenie pri ispytaniyah na vysokociklovuyu ustalost' / Yu. Ni, Ch.V. Chzhou // Fizika metallov i metallovedenie. – 2021, – T. 122, – №10. – S. 1065-1074. – DOI: 10.31857/S0015323021100077.
42. *Nikitin, I.S.* Mul'tirezhimnaya model' razvitiya ustalostnyh povrezhdenij// I.S. Nikitin, N.G. Burago, A.B. Zhuravlev, A.D. Nikitin // Prikladnaya matematika i mekhanika/ 2020, t.84, №5, s. 663-674 DOI: 10.31857/S0032823520050070.
43. *Vlasov A.* Elastic-Plastic Thermomechanical Fatigue Analysis of Forging Dies / A. Vlasov, N. Biba, S. Stebunov // Key Engineering Materials Submitted: 2016-02-12 ISSN: 1662-9809, Vol. 716, pp 667-676 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.716.667 (s) 2016 Trans Tech Publications, Switzerlan.
44. *Schlayer, M.; Warwas, M.; Seifert, T.* A Temperature-Dependent Viscoplasticity Model for the Hot Work Steel X38CrMoV5-3, Including Thermal and Cyclic Softening under Thermomechanical Fatigue Loading. Materials 2023, 16, 994. <https://doi.org/10.3390/ma16030994>.
45. *Schlayer M.* Isothermal and thermomechanical low-cycle fatigue of the hot work steel X38CrMoV5-3 with and without averaging heat treatment / M. Schkayer, M. Warwas, K. Hintz, D. Kohler, T. Seifert // International Journal of Fatigue. 2025. Vol. 178. Article 109353. DOI: 10.1016/ijfatigue.2025.109353.

Sergey Rogulin, Graduate Student of the SPD Department. E-mail: serzh.rogulin2013@yandex.ru

Evgeniy Sosenushkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Composite Materials Department.

E-mail: sen@stankin.ru

Ruslan Amkhadov, Graduate Student of the Department of High-Performance Processing Technologies.

E-mail: sarmak55555@mail.ru

Elena Yanovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics.

E-mail: elena_yanovskaya@bk.ru