

УДК 621.771: 514.18

Явтушенко А. В.  
Проценко В. М.**РАСЧЕТ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИЮ  
В СРЕДЕ AUTOCAD MECHANICAL**

При изучении дисциплины «Оборудование цехов ОМД» одной из основных целей является овладение способностью выполнять математические модели сборочных единиц оборудования с проведением необходимых расчетов и разработкой технической документации, применяя при этом современные компьютерные технологии. Это позволяет всесторонне изучать поведение частей оборудования еще в процессе их разработки, анализировать геометрию, проводить инженерные расчеты, получать фотореалистичные изображения.

Вопросу автоматизации компьютерного моделирования посвящено большое количество работ [1–4], рассматриваются возможности автоматизации графического моделирования в КОМПАС-3D, AutoCAD Mechanical, Autodesk Inventor, ABAQUS и др., которые предоставляют инструменты проектирования на основе правил и средств автоматизации, ускоряющие процесс и позволяющие пользователям сконцентрироваться на реализации проектного замысла, а не на моделировании геометрии вручную. На базе функциональных требований к изделию системы САПР автоматически создают интеллектуальные компоненты, давая возможность экономить время проектировщика, позволяют осуществлять проверку моделей без испытания опытных образцов.

Приведенные в литературе данные в основном относятся к моделированию валов редукторов, рычагов, кулачков и др. деталей машин.

Целью работы является изучение возможности геометрического моделирования валков прокатных станов и выполнение расчетов на прочность и деформацию в среде AutoCAD Mechanical 2018 [5].

Прокатные валки – сменный рабочий и технологический инструмент прокатных станов, который в значительной мере определяет производительность станов, качество проката, стабильность технологии, энергоемкость и безаварийность процесса прокатки.

В клети кварто рабочие валки работают на кручение, а опорные валки разгружают их от силы прокатки, т. е. работают только на изгиб, имея в 2–3 раза больший диаметр бочек по сравнению с бочками рабочих валков [6].

При определении прочности валок рассматривают как двухопорную балку, нагруженную силой прокатки и крутящим моментом, что приводит к появлению в теле валка нормальных и касательных напряжений. Расчетный коэффициент запаса прочности  $n$  должен превышать допустимое значение [ $n$ ]:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq n \quad \text{или} \quad n = \frac{\tau_B}{\tau} \geq n, \quad (1)$$

где  $\sigma_B$  и  $\tau_B$  – предел прочности материала валка по нормальным и касательным напряжениям в расчетах принимают  $\tau_B = 0,7 \cdot \sigma_B$ , МПа;

$\sigma$  и  $\tau$  – расчетные нормальные и касательные напряжения, соответственно, МПа.

Допустимое значение коэффициента запаса прочности для всех деталей клети, кроме станины, принимают равным 5, а для станины, как наиболее ответственного элемента прокатного стана – 10 [6].

Создадим расчетную модель и выполним расчет на прочность и деформацию рабочих и опорных валков четырехвалковой клети стана 550/1500 × 2500 для холодной прокатки полос, используя такие же исходные данные, как в примере 17 [6, стр. 108].

Расчетная схема валков клетки кварто с указанием размеров и нагрузок приведена на рис. 1. Поскольку нагрузки на рабочий и опорный валок различны, то расчеты проводим отдельно для рабочего и опорного валка.

На первом этапе решения задачи по схеме на рис. 1 (или по компоновочному чертежу) выполняется 2D модель валка при помощи генератора валов AutoCAD Mechanical.

На втором этапе с помощью диалогового окна "Расчет вала" производится расчет. Исходными данными для расчета валка являются: крутящий момент на рабочем валке; силы, действующие на рабочий и опорный валки в вертикальной и горизонтальной плоскости.

Генератор валов автоматически вычисляет реакции опор и строит эпюры изгибающих моментов и напряжений. Расчет на прочность выполняется в соответствии с немецким стандартом DIN 743. В качестве материала рабочих и опорных валков выбраны легированные стали, соответственно 9X2 и 9XF, имеющие предел текучести  $\sigma_T = 600$  МПа и предел прочности  $\sigma_B = 800$  МПа.

Результаты расчетов рабочего и опорного валков представлены соответственно на рис. 2 и 3. По полученным эпюрам определяются опасные сечения валка – посередине бочки и в шейке валка по галтели (в месте соединения шейки и бочки валка). При необходимости уточняется геометрия валка. При этом генератор валов автоматически пересчитывает все данные. На заключительном этапе выполняется рабочий чертеж валка.

Сравнивая расчетные данные, приведенные в литературе с вычисленными значениями в AutoCAD Mechanical, можно убедиться, что они имеют близкие значения. Так коэффициент запаса статической прочности по пределу текучести для опорного валка (крутящий момент отсутствует) равен 5,3 (рис. 3), а в литературе [6] – 5,2 в сечении 1–1. В шейке рабочего валка определен только запас прочности при кручении  $n_\tau = 6,8$  [6]; по нашим данным коэффициент запаса прочности с учетом кручения и изгиба равен  $n_{ш}^p = 4,4$  (рис. 2), что также достаточно [6, стр. 109]. При совместном действии кручения и изгиба суммарное (эквивалентное) напряжение в шейке для стальных валков определяется по формуле (данные взяты на рис. 2):

$$\sigma_{\text{экв.ш}}^p = \sqrt{\sigma_{\text{из.ш}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{кр.ш}}^2} = \sqrt{21,2^2 + 3 \cdot 78,4^2} = 137,4 \text{ МПа.}$$

$$n_{ш}^p = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{экв.ш}}^p} = \frac{600}{137,4} = 4,4.$$

Определим расчетные коэффициенты запаса прочности по пределу прочности, используя формулу (1) и расчетные данные на рис. 2 и 3:

$$\text{в бочке опорного валка } n_6^{\text{оп}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\text{из.б}}^{\text{оп}}} = \frac{800}{78,3} = 10,2;$$

$$\text{в шейке опорного валка } n_{ш}^{\text{оп}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\text{из.ш}}^{\text{оп}}} = \frac{800}{121,5} = 6,6;$$

$$\text{в шейке рабочего валка } n_{ш}^p = \frac{\tau_B}{\tau_{\text{кр.ш}}^p} = \frac{800 \cdot 0,7}{78,4} = 7,1.$$

Кроме того, AutoCAD Mechanical выполняет расчет на выносливость (усталостную или циклическую прочность) в любом сечении валка. Для рабочего и опорного валков коэффициент запаса усталостной прочности в шейке валка по галтели (в месте соединения шейки и бочки валка) соответственно равен 3,2 и 2,1 (рис. 2 и 3). Минимально допустимое значение этого коэффициента 1,3–2,5 [7].

Таким образом, все полученные коэффициенты запаса прочности выше допустимого  $[n] = 5$ , т. е. все элементы валков имеют достаточную прочность, а наиболее слабыми элементами валков является шейка в месте соединения с бочкой валка. Это сечение является концентратором напряжений.

Прогиб валков влияет на неравномерность толщины прокатываемой полосы по ширине и на жесткость прокатной клетки. Прогиб опорного валка, определенный AutoCAD Mechanical (рис. 3, 4), составил посередине бочки 0,81 мм, вычисленный в литературе – 0,86 мм [6], что достаточно близко.

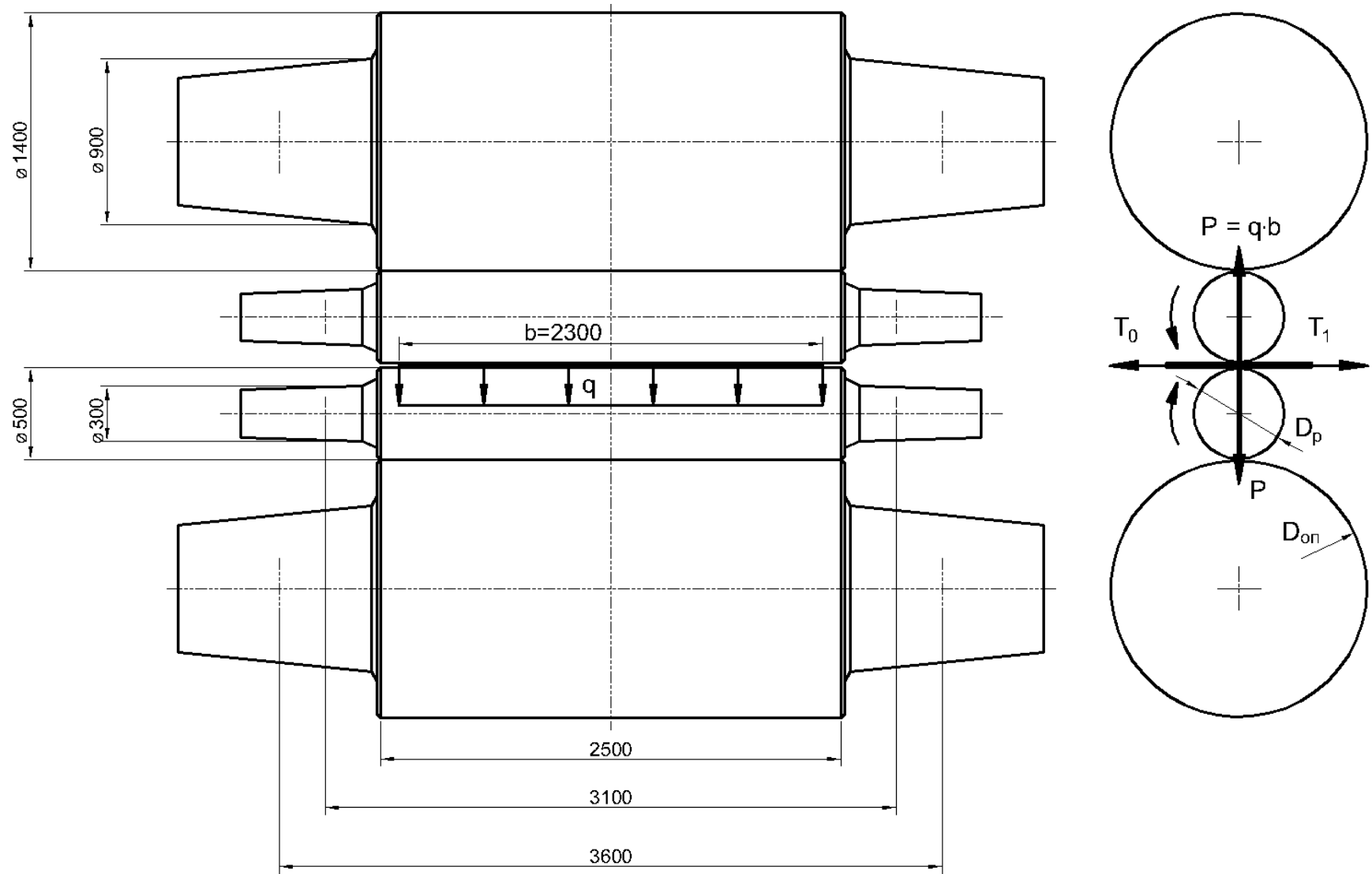


Рис. 1. Схема к расчету четырехвалковой клетки кварто на прочность и деформацию

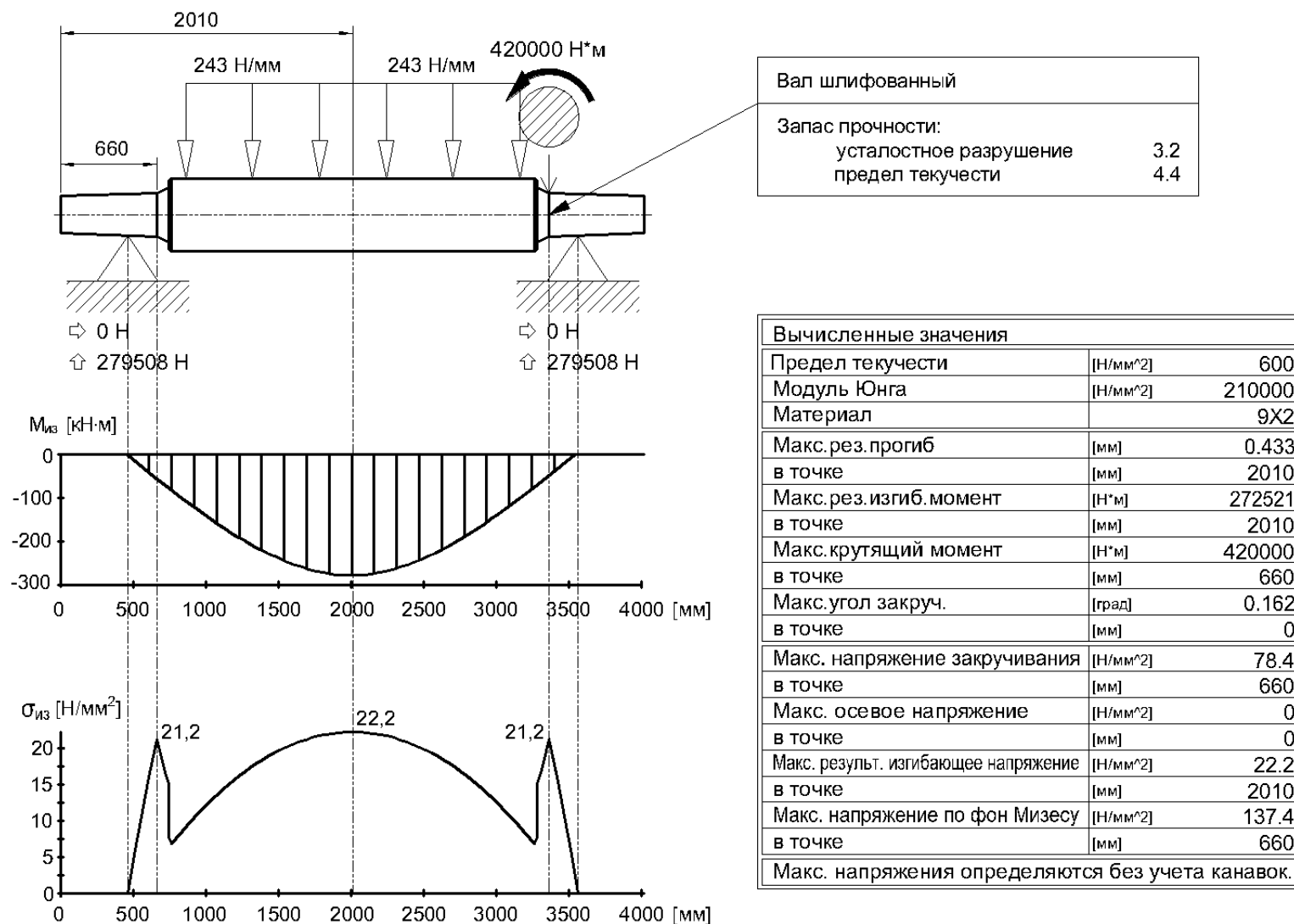


Рис. 2. Результаты расчета рабочего вала на прочность и деформацию

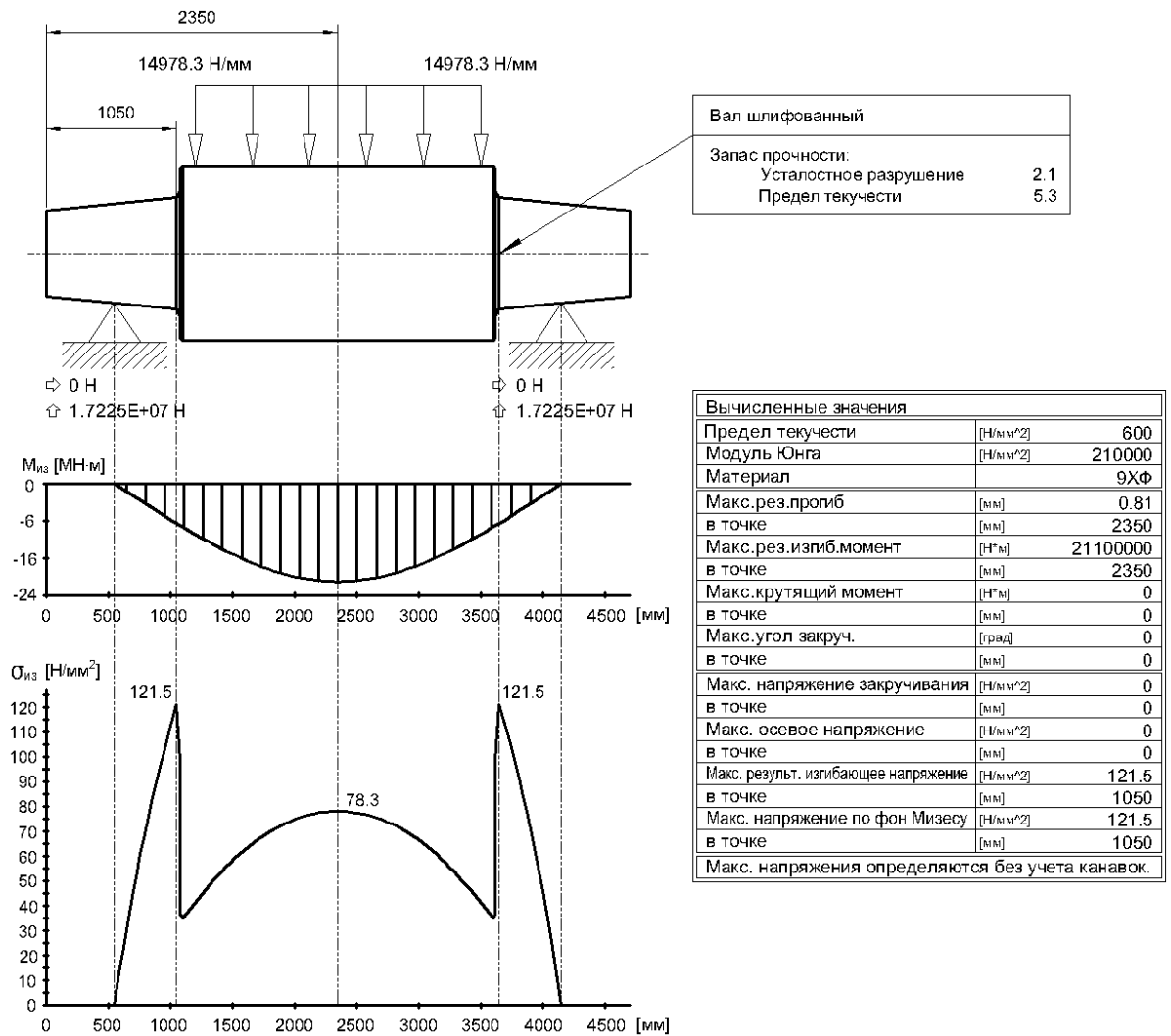


Рис. 3. Результаты расчета опорного вала на прочность и деформацию

AutoCAD Mechanical позволяет выполнять также оценку напряженно-деформированного состояния металла методом конечных элементов (МКЭ). Эти результаты могут быть использованы для усовершенствования конструкции прокатного вала. Цель метода – дать представление о распределении напряжений и деформаций. На рис. 4 представлены результаты расчета опорного вала МКЭ, которые показывают, что локализация напряжений происходит на поверхности вала, по галтели, в месте соединения шейки и бочки. Условно опоры вала показаны точечными, поэтому и напряжения в них максимальные. На практике валки установлены на подшипниках и нагрузка распределяется по всей ширине подшипникового узла, что можно учесть при расчетах в AutoCAD Mechanical.

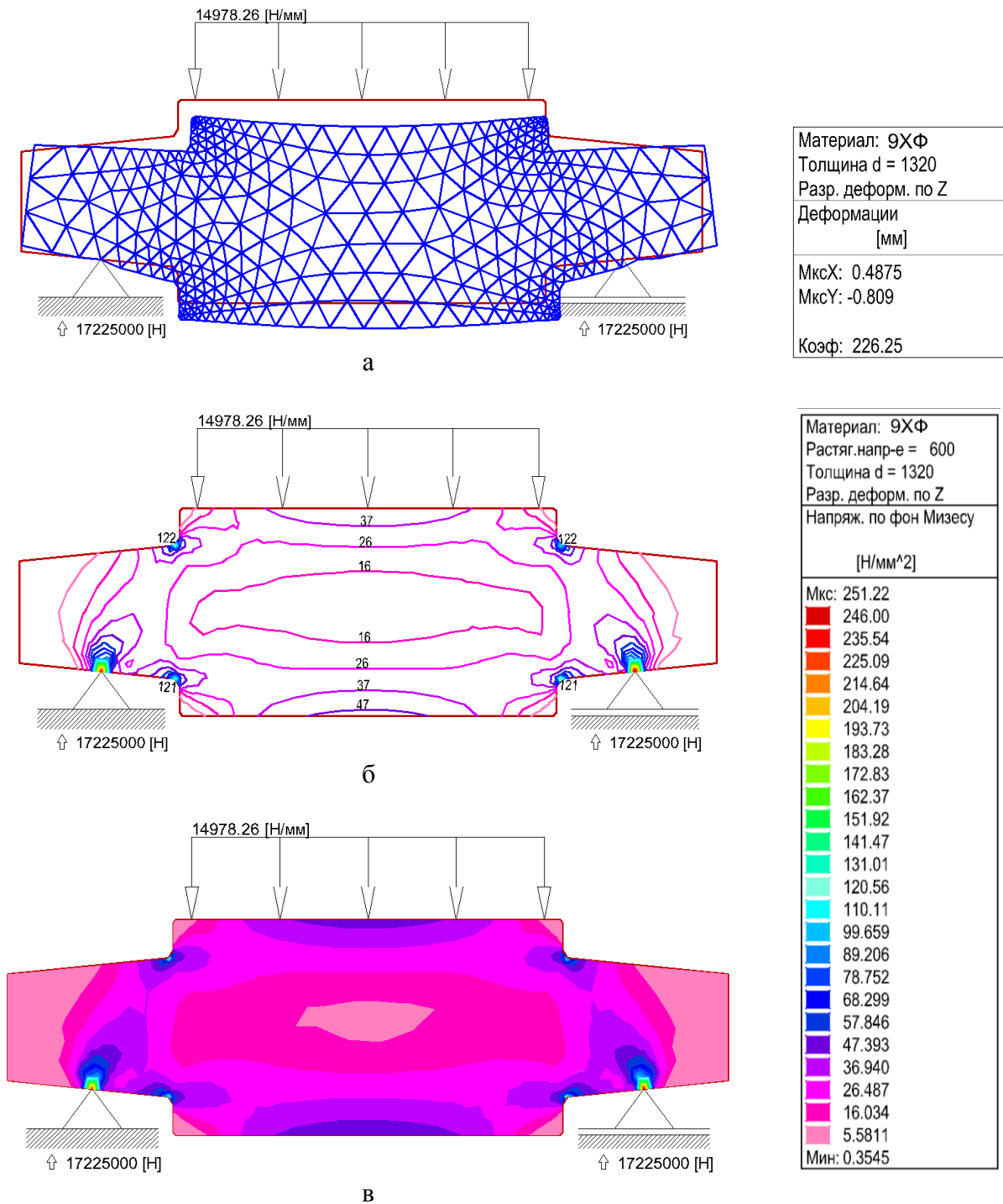


Рис. 4. Расчет методом конечных элементов опорного вала на деформацию (а); изолинии (б) и изообласти (в) напряжений в валке

## ВЫВОДЫ

Использование генераторов компонентов и расчетных модулей AutoCAD Mechanical 2018 позволяет автоматизировать многие стандартные проектные задачи, выполнять расчеты в соответствии с международными стандартами DIN или ANSI и значительно сократить время выполнения расчетов на прочность и деформацию валков прокатных станков. Сравнение расчетных данных, полученных в AutoCAD Mechanical 2018, показывает их соответствие с литературными данными, полученными расчетным путем. Реализация алгоритма МКЭ позволяет учитывать в расчетах различные свойства материалов и разнообразные граничные условия для областей со сложной конфигурацией, наглядно представить результаты расчетов. Показано что программный комплекс AutoCAD Mechanical 2018 может быть использован при расчете валков рабочих клетей прокатных станков.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением* / М. А. Цепин, В. В. Бегнарский, Н. Л. Лисунец, М. В. Сеницын, М. А. Ерохов // *Цветные металлы*. – 2007. – № 5. – С. 98–101.
2. *Большаков В. П. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex : учебный курс* / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, А. А. Сергеев. – СПб. : Питер, 2011. – 336 с.
3. *Грицына Н. И. Проектирование деталей машин с использованием генераторов компонентов и расчетных модулей Autodesk Inventor* / Н. И. Грицына // *Вестник ХНАДУ*. – 2015. – Вып. 69. – С. 13–18.
4. *Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навч. посіб. / П. В. Боровік. – Алчевськ : ДонДТУ, 2012. – 170 с.*
5. *Федорченков А. П. AutoCAD Mechanical. Практическое руководство* / А. П. Федорченков, А. М. Кимаев. – М. : «ТехБук», 2004. – 688 с.
6. *Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков* / А. А. Королев. – М. : *Металлургия*, 1985. – 376 с.
7. *Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для ВУЗов* / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребеник и др. – М. : *Металлургия*, 1988. – 680 с.

## REFERENCES

1. *Ispol'zovanie specializirovannyh programm pri razrabotke tehnologicheskikh processov obrabotki metallov davleniem* / M. A. Cepin, V. V. Begnarskij, N. L. Lisunec, M. V. Sinicyn, M. A. Erohov // *Cvetnye metally*. – 2007. – № 5. – S. 98–101.
2. *Bol'shakov V. P. ZD-modelirovanie v AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex : uchebnyj kurs* / V. P. Bol'shakov, A. L. Bochkov, A. A. Sergeev. – Spb. : Piter, 2011. – 336 s.
3. *Gricyna N. I. Proektirovanie detalej mashin s ispol'zovaniem generatorov komponentov i raschetnyh modulej Autodesk Inventor* / N. I. Gricyna // *Vestnik HNADU*. – 2015. – Vyp. 69. – S. 13–18.
4. *Borovik P. V. Teopetichni doslidzhennja procesiv obrobki metaliv tiskom na osnovi metodu skinchenih elementiv : navch. posib.* / P. V. Borovik. – Alchevs'k : DonDTU, 2012. – 170 s.
5. *Fedorchenkov A. P. AutoCAD Mechanical. Prakticheskoe rukovodstvo* / A. P. Fedorchenkov, A. M. Kimaev. – M. : «TehBuk», 2004. – 688 s.
6. *Korolev A. A. Konstrukcija i raschet mashin i mehanizmov prokatnyh stanov* / A. A. Korolev. – M. : *Metallurgija*, 1985. – 376 s.
7. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-h tomah. T. 3. Mashiny i agregaty dlja proizvodstva I otdelki prokata: uchebnik dlja VUZov* / A. I. Celikov, P. I. Poluhin, V. M. Grebenik i dr. – M. : *Metallurgija*, 1988. – 680 s.

Явтушенко А. В. – д-р техн. наук, проф. ЗГИА;

Проценко В. М. – канд. техн. наук, доц. ЗГИА.

ЗГИА – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

E-mail: [ayav2017@gmail.com](mailto:ayav2017@gmail.com); [protsenkovm@yahoo.com](mailto:protsenkovm@yahoo.com)