

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА ГТД

© 2019 К.А. Безсонов, Е.М. Безсонова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 15.02.2019

В работе рассмотрены вопросы, связанные с применением топологической оптимизации на этапе проектирования изделия. В ходе данной работы была разработана методика проектирования и изготовления изделий с применением топологической оптимизации, которая была апробирована на компоненте станочного приспособления, необходимого для выполнения механической обработки. 3D модель изделия, спроектированного с помощью данной методики, была импортирована в 3D сборку станочного приспособления и далее был проведен анализ деформаций элементов приспособления под действием сил резания с использованием системы NX Nastran. При проведении анализа рассматривалось несколько вариантов конструкций элементов приспособления, деформация которых под действием сил резания оказывала непосредственное влияние на обеспечение точности получаемого на операции геометрического размера. Показано, что разработанная методика проектирования, в сочетании с применением с NX Nastran, позволяет спроектировать изделие с оптимальными массовыми и прочностными характеристиками; это существенно уменьшает количество получаемого брака в процессе механической обработки деталей.

*Ключевые слова:* топологическая оптимизация, проектирование, механическая обработка.

## ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией информатизации промышленных предприятий является цифровизация процессов производства и процессов конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП), объединяющая системы проектирования, планирования и управления производством в систему автоматизированного проектирования и автоматизации производственных процессов (САПР/ АПП), или интегрирующая CAD/CAM/CAE/PDM-системы.

Общие требования к разработке цифровых моделей процессов затронуты в работе [10].

Важное значение для обеспечения открытости САПР, ее интегрируемости с другими автоматизированными системами имеют интерфейсы, представляемые реализованными в системе форматами межпрограммных обменов. Очевидно, что, в первую очередь, необходимо обеспечить связи между CAE, CAD и CAM-подсистемами. Пример интегрирования CAD/CAE/CAM представлен в работе [1], в которой изложен метод вариационной размерной параметризации, интегрированный в методику проектирования TOP-DOWN. Так же в работе [2] рассмотрена технология нисходящего проектирования в сквозных системах 3D моделирования и управления жизненным циклом изделия, позволяющая использовать параллельные бизнес-процессы и организовать эффективное управление измене-

ниями в изделии. В статье [3], рассматривается геометрическое моделирование пространственных отклонений деталей и сборок. В работах [4-5] рассмотрены вопросы оптимизации конструкций станочного приспособления исходя из условия точности геометрического параметра обрабатываемой детали. В книгах [6-7] изложено применение топологии на ранних стадиях проектирования. Метод представленный в данной книге рассматривается как один из наиболее эффективных подходов к оптимизации конструкции. В статье [8] рассматриваются методы структурной оптимизации «ESO» и «BESO», которые наглядно доказывают эффективность в решении широкого круга задач топологической оптимизации, включая структуры с геометрическими и материальными нелинейностями, энергопоглощающих устройств и периодических структур. В работе [9] предложен метод САПР/интеграции с помощью «общей модели данных» (МЧР), содержащей все необходимые параметрические данные для моделирования CAD и CAE анализа. Подводя итог сказанному, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемой области идет активная работа в применении топологической оптимизации, которая позволяет рационально оптимизировать конструкцию с учетом нагрузок и прочностных характеристик.

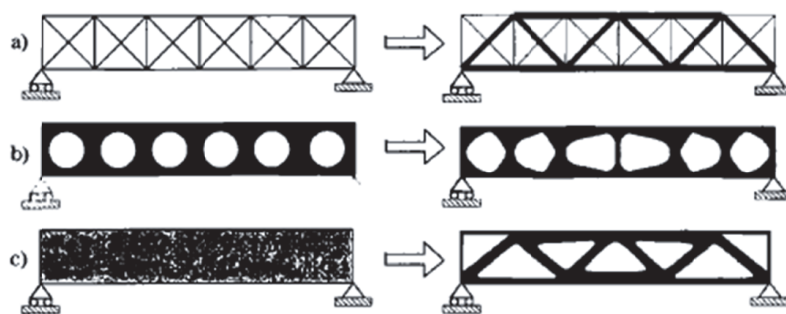
При проектировании изделий актуально использование структурной оптимизации, которая заключается в поиске оптимальной геометрии, при заданных ограничениях и подразделяется на следующие виды: оптимизацию размеров, формы, и топологической оптимизации (рис. 1).

*Безсонов Кирилл Андреевич, аспирант.*

*E-mail: kirillbez2306@gmail.com*

*Безсонова Елена Михайловна, аспирант.*

*E-mail: dobryshkina93@mail.ru*



**Рис. 1.** Три категории оптимизации конструкции:  
 а – оптимизация размеров структуры ферменной конструкции;  
 б – оптимизация формы, с – оптимизация топологии

Метод топологической оптимизации (рис. 1,а), на сегодняшний день является самым инновационным и перспективным. Его цель заключается в поиске оптимального распределения материала в заданной области для заданных нагрузок и граничных условий. Известными величинами могут являться приложенные нагрузки, возможные условия поддержки, объем конструкции и возможно некоторое конструктивные ограничения, например, расположение и размер отверстий или сплошных областей.

Активное использование топологической оптимизации в инженерной практике объясняется:

- сокращением процесса проектировки новых изделий;

- экономической эффективностью аддитивных технологий изготовления деталей;
- уникальными конструкторскими и инженерными решениями, полученными в результате топологической оптимизации.

С применением топологической оптимизации значительно ускоряется процесс проектирования изделия. Минимум начальных данных (расчетная область, граничные условия, свойства материалов) достаточно для того чтобы определить оптимальную топологию изделия.

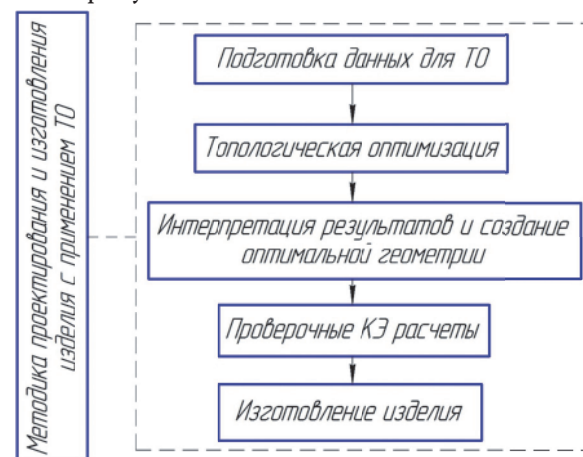
Топологическая оптимизация конструкций главным образом проводится при статических нагрузках. Вместе с тем следует отметить, что реальные свойства материала, определяемые его микроструктурой, зависят как от скорости нагружения, так и от динамики изменения приложенной нагрузки. Проблемы математического моделирования формирования микроструктуры рассматривались в исследованиях [11,12]. В работах [13-15] описывался метод определения функциональных свойств материалов при высоких скоростях деформаций.

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В процессе проектирования и изготовления сложных изделий в условиях современного производства зачастую следует придерживаться-

ся определенной последовательности, которая регламентируется методиками или стандартами. Опираясь на большое количество изученного материала и приобретенный практический опыт в использование ТО было принято решение, разработать собственную оригинальную методику по проектированию и изготовлению изделий с применением топологической оптимизации.

Разработанная методика включает в себя несколько основных этапов, которые представлены на рисунке 2.



**Рис. 2.** Основные этапы методики проектирования и изготовления изделий с применением ТО

Подготовка данных для ТО включает:

- выбор методов изготовления и определение технологических требований к изделию;
- определение действующих нагрузок и ограничений;
- назначение необходимых условий на геометрию, эксплуатационных требований и ограничений к оптимизируемому изделию;
- создание 3D модели детали/узла;
- определение физико-механических свойств используемых материалов.

После подготовки данных следует этап топологической оптимизации, для которого необходимо:

- создать расчетную область;
- создание сетки КЭ, граничных и контактных условий;

- подбор параметров оптимизации;
- ТО и проверочные КЭ расчет.

Далее необходимо выполнить обработку результатов топологической оптимизации и создание оптимальной геометрии. Для этого необходимо:

- определить основных конструктивных элементов;
- выполнить экспорт результатов ТО;
- создать оптимальную геометрию;
- выполнить проверочные КЭ расчеты.

Следующим и заключительным этапом является изготовления изделия. В рамках выполняемой работы будет рассмотрен один из методов создания изделия спроектированных с применением топологической оптимизации, которым является селективное лазерное сплавление. При подготовке процесса изготовления необходимо:

- проверка качества модели, по которой будет проходить изготовление;
- проведение компьютерного анализа термических деформаций и технологичности изделия;
- выбор положения и ориентации изделия на рабочей платформе;
- осуществление подбора режимов лазерного сплавления и стратегии движения лазерного луча;
- заполнение камеры построения инертным газом;
- запуск процесса СЛС.

После завершения данного процесса необходимо полученное изделие вместе с рабочей платформой извлечь из установки и затем отделить деталь от рабочей платформы и поддержек. Отделенную заготовку следует подвергнуть высокотемпературной газостатической обработке (ГИП), которая увеличивает 1,5...2 раза предел прочности материала.

Далее деталь подвергается стендовым испытаниям, где происходит проверка её прочностных характеристик на соответствие заданным эксплуатационным требованиям. В случае прохождения испытаний следующим этапом является разработка технологической документации по изготовлению.

### АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

В данной главе проведена апробация разработанной методики на примере топологической оптимизации компонента станочного приспособления. Трёхмерная сборка станочного приспособления представлена на рисунке 3.

В процессе механической обработки детали на данном приспособлении было выявлено, что его конструкция не обладает достаточной точностью, а именно не обеспечивает выполнение

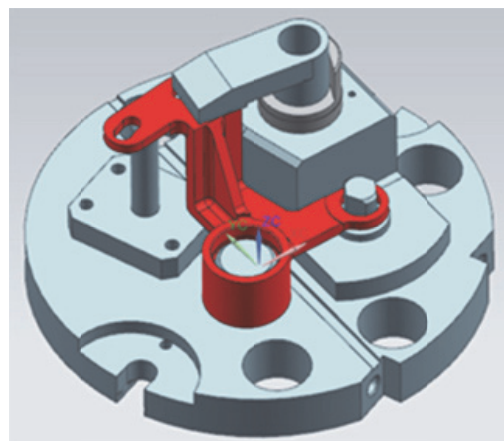


Рис. 3. 3D модель сборки станочного приспособления

размера  $A=60$  мм между осью базового отверстия заготовки и осью паза с допуском  $T=\pm 0,05$  мм (рис. 4). В связи с этим было принято решение провести инженерный анализ деформаций элементов приспособления и заготовки в результате действия силовых факторов в САЕ системе Siemens NX.

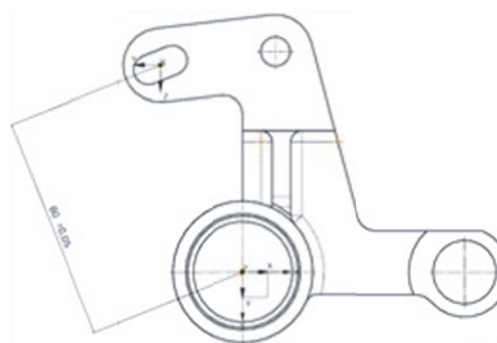


Рис. 4. Технологическое требование, которое необходимо выполнить при обработке

На первом этапе сборка приспособления нагружалась максимально возможными при данной обработке силами резания и рассматривались возникающие в её элементах напряжения и перемещения узлов сетки конечных элементов (деформация). Расчёты показали, что максимальное значение «Напряжения по элементам\узлам» составило 409,5 МПа, что не превышает предела текучести для рассматриваемого материала равного 950 МПа (рис. 5). В тоже время максимальное значение «Перемещения по узлам» составило 0,089 мм (рис. 6). Такие перемещения после снятия нагрузки могут привести к погрешности размера  $A$ , превышающей заданный допуск  $T=0,05$  мм и получению брака при изготовлении данной детали

На следующем этапе был рассмотрен ещё один вариант конструкции детали «опора». Такая конструкция, за счёт увеличения габаритов, имеет ещё большую жёсткость, а также значи-

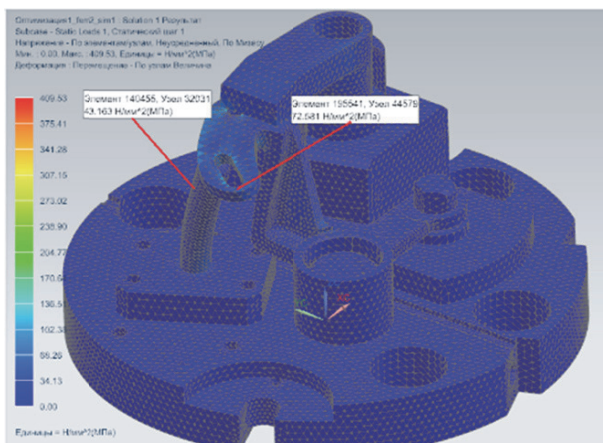


Рис. 5. Картина распределения напряжений по Мизесу (первый вариант)

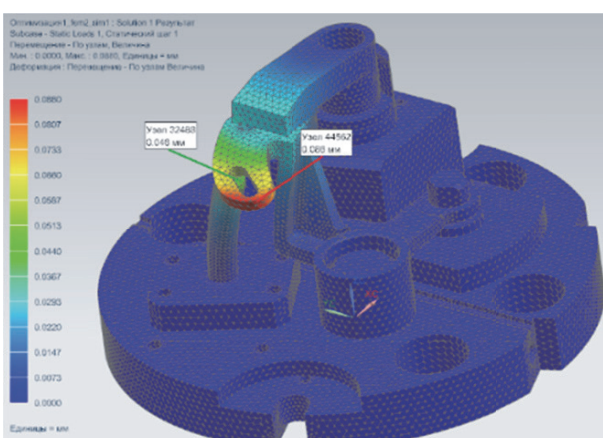


Рис. 6. Картина общих перемещений (первый вариант)

тельную площадь контакта с заготовкой. Масса предложенной конструкции 0,89 кг.

Расчёты, выполненные при использовании предложенной конструкции опоры, дали следующие результаты. Максимальные напряжения уменьшились до значения 40,4 МПа (рис. 7), что значительно меньше напряжений, полученных при использовании первого варианта конструкции детали «опора». Максимальное значение деформаций («Перемещения по узлам») составило 0,05 мм (рис. 8).

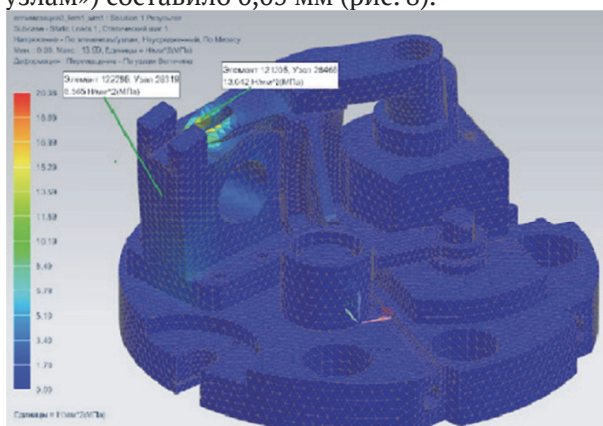


Рис. 7. Картина распределения напряжений по Мизесу (второй вариант)

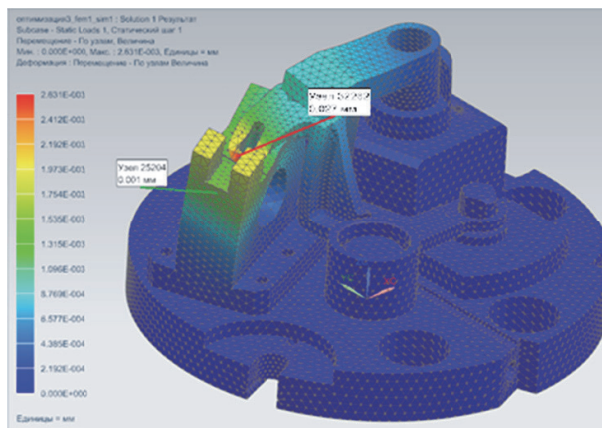


Рис. 8. Картина общих перемещений (второй вариант)

Такая деформация элементов, практически исключает возможность появления брака при обработке, но данный вариант «опоры» имеет достаточно большие габариты и массу, что существенно увеличивает себестоимость его изготовления. В связи с этим можно сделать вывод, что оптимизация формы компонента приспособления в данном случае является недостаточно эффективной с точки зрения экономических затрат на его изготовление, поэтому в данной исследовательской работе актуально применение топологической оптимизации, а именно ранее разработанной методики. После проведения подготовительных этапов, топологической оптимизации с последующим редактированием полученной геометрии, несколько вариантов оптимизированных моделей были импортированы в 3D сборку приспособления, где так же подверглись нагружениям от сил резания. В результате оптимальным вариантом для последующего изготовления была определена модель, геометрия которой на этапе постредактирования была создана с помощью PolyNURBS сплайнов. Максимальные напряжения в данной модели составили 51,01 МПа (рис. 9), что значительно меньше напряжений, полученных при использовании первого и второго вариантов конструкции детали, а также не значительно отличается от результатов, геометрию которой редактировали в CAD. Максимальное значение деформаций (рис. 10) составило 0,01 мм, что на порядок меньше допуска на операционный размер. Масса полученного изделия составила 0,25 г.

Затем был смоделирован процесс 3D печати выбранной модели в программе Simufact Additive, с последующим анализом термических напряжений, которые могут привести к короблению изделия после его изготовления и отделения от рабочей платформы. Результаты данного анализа показали, что после изготовления и отделения от рабочей платформы происходит максимальное перемещение изделия по оси X – 1,82 мм и по оси Z – 0,70 мм (рис. 11). Полученную модель после

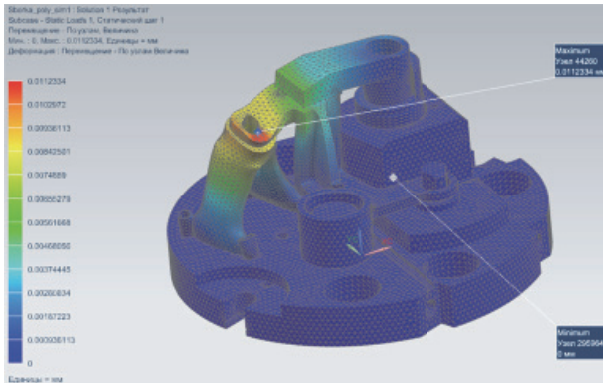


Рис. 9. Картина перемещений оптимизированного компонента

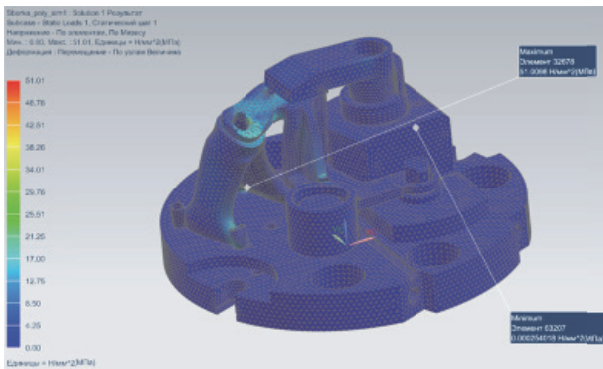
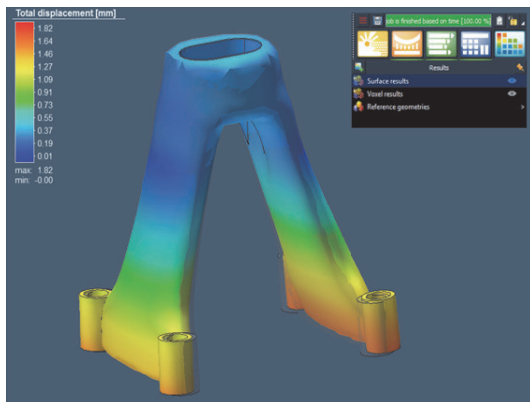


Рис. 10. Картина распределения напряжений по Мизесу

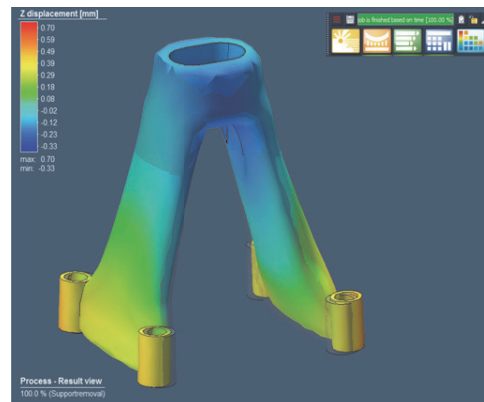
постредактирования в Siemens NX импортировали в 3D сборку, где так же проводился анализ геометрических и конструктивных характеристик, по результатам которого был сделан вывод, что цилиндрические отверстия полученного изделия под действием термических деформаций были смещены в линейном и угловых направлениях, что однозначно приведет к трудностям её установки с контактирующей деталью и возможному изготовлению брака детали, которое будет обрабатываться в данном приспособлении.

Затем для получения годного изделия было принято решение в программе Simufact Additive задать коэффициент коррекции со значением «-1», чтобы полученные в результате коробления перемещения были созданы в противоположном направлении. С полученной STL моделью был снова смоделирован процесс изготовления, где при воздействии термических деформаций геометрия детали приблизится к своему номинальному положению. В результате перемещение по оси X составило 1,12 мм, по оси Z = 0,695 мм (рис. 12).

Полученное изделие было снова экспортировано в программное обеспечение Siemens NX, где так же проводился анализ геометрических и конструктивных характеристик детали в составе сборки приспособления. В результате анализа был сделан вывод, что полученное изделие

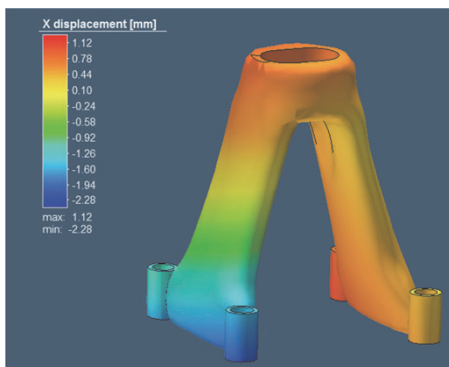


а)

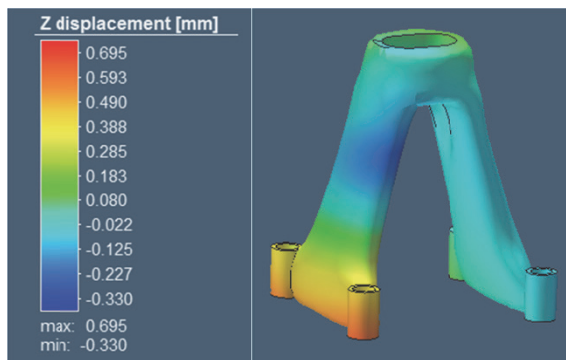


б)

Рис. 11. Картины перемещений изделия (а - по оси X; б - по оси Y)



а)



б)

Рис. 12. Картины перемещений изделия (а - по оси X; б - по оси Y)

по своим геометрическим параметрам соответствует своим эксплуатационным требованиям, так как существенного отклонения геометрических параметров выявлено не было.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был дан информационно-аналитический обзор работ по вопросам применения информационных технологий на этапе подготовки производства, а именно применения топологической оптимизации на этапе проектирования, который подтвердил актуальность выбранного направления исследования. В представленной работе изложена разработка методики проектирования и изготовления изделий с применением топологической оптимизации. Рассмотрены основные этапы данной методики, а также её апробация на примере компонента станочного приспособления.

Применение данной методики позволит получать качественно-оптимизированные модели, имеющие оптимальную силовую конструкцию с меньшей массой и учитывающие влияния термических деформаций, после изготовления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balaykin A.V., Bezsonov K.A., Nekhoroshev M.V., Shulepov A.P.* Developing Parametric Models for the Assembly of Machine Fixtures for Virtual Multiaxial CNC Machining Centers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 302, Issue 1, pp 325-330, 2017.
2. *Lihachev M.V.* // Vestnik SibGAU vol 16 pp 423-429, 2015.
3. *Jaiswal P., Huang J., Rai R.* // Computer-Aided Design vol 74 pp 45-54, 2016.
4. *Nekhoroshev M. V., Meshcheryakov A.V., Bezsonov K.A., Shulepov A.P.* Design Optimization of Machine Accessories through Analysis of their Elements Deformation in NX Nastran // AER-Advances in Engineering, 2018.
5. Разработка параметрических моделей сборки станочных приспособлений для виртуальных многоосевых обрабатывающих центров с ЧПУ: лабораторный практикум / *Нехорошев М.В., Мецерыков А.В., Шулепов А.П., Безсонов К.А., Кулевец И.С.* Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. 207 с.
6. *Bendsoe M.P.* Optimization of Structural Topology, Shape, and Material // Springer. 1995. 267 p.
7. *Bendsoe M.P., Sigmund O.* Topology Optimization: Theory, Methods and Application. Heidelberg, Springer. 2003. 393 p.
8. *Huang X.*, Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures // WILEY. 2010. 237
9. *Gujarathi G.P.* // Ma Y.-S. 2011 Journal of Manufacturing Systems 30 (2011) 118-132.
10. *Grechnikov F.V., Khaimovich A.I.* Development of the requirements template for the information support system in the context of developing new materials involving big data // EUR Workshop Proceedings. Cep. "Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2015" 2015. С. 364-375.
11. *Шутарев И.Л., Хаймович А.И.* Моделирование микроструктуры при высокоскоростной штамповке компрессорных лопаток из титанового сплава BT9 // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 11. С. 41-44.
12. *Мухеев В.А., Хаймович А.И.* Математическое моделирование процессов динамической рекристаллизации поликристаллических материалов в условиях интенсивной пластической деформации // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 7. С. 37-42.
13. *Khaimovich A.I., Balyakin A.V., Kondratev A.I.* Methodology of rheological material properties phenomenological modeling at high speed cutting by reverse analysis. // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9. № 11. С. 753-760.
14. *Khaimovich A.I., Balaykin A.V.* Analysis of plastic properties of titanium alloys under severe deformation conditions in machining // International Journal of Engineering and Technology. 2014. Т. 6. № 5. С. 2184-2190.
15. *Grechnikov F., Khaimovich A.* The study of plastic deformation at high strain rates in upset forging of cylinders // Key Engineering Materials. 2016. Т. 684. С. 74-79.

### APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN PREPARATION OF GTE PRODUCTION

© 2019 K.A. Bezsonov, E.M. Bezsonova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The paper addresses issues related to the use of topological optimization at the product design stage. In the course of this work, a technique for designing and manufacturing products using topological optimization was developed, and it was also tested on the component of the machine tool needed to perform machining. The 3D model of the product designed using this technique was imported into the 3D assembly of the machine tool and then the analysis of the deformations of the fixture elements under the action of cutting forces was performed using the NX Nastran system. During the analysis, several variants of the structure of the fixture elements were considered, the deformation of which under the action of cutting forces had a direct impact on ensuring the accuracy of the geometric size obtained in the operation. It is shown that the developed design technique, in combination with the use of NX Nastran, allows to design a product with optimal mass and strength characteristics, which will significantly reduce the amount of scrap produced during the machining of parts.

*Keywords:* topological optimization, design, machining.

*Kirill Bezsonov, Graduate Student.*

*E-mail: kirillbez2306@gmail.com*

*Elena Bezsonova, Graduate Student.*

*E-mail: dobryshkina93@mail.ru*