

УДК 681.7.068



*И.С. Петряшов, В.Ф. Булавин*  
Вологодский государственный университет

## ИНЖЕНЕРНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ В МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Машиностроительный сектор Северо-Западного региона последовательно реализует внедрение цифровых технологий на основе САПР продуктов. Комплексное применение идеологии CAD/CAM/CAPP/CAE находится в стадии становления, хотя отдельные его компоненты нашли широкое применение на предприятиях всех уровней. В статье рассматриваются результаты формирования компетенций в области CAE/CAO проектирования, обеспечивающих объединение передовых производственных технологий и бизнес-моделей для их распространения в сфере малых и средних машиностроительных предприятий. Выпуск изделий для рынков с новыми качествами и создание высокотехнологичных направлений в промышленности приводят к производству глобально конкурентоспособной продукции.

Цифровое проектирование, топологический инжиниринг, оптимизация, цифровой двойник, малое машиностроительное предприятие.

Экономика нового технологического этапа предусматривает интеграцию средних и малых машиностроительных предприятий в цифровое поле виртуальных предприятий на основе стратегии перехода к цифровому производству в рамках нацпроектов и инициативы «Технет» [1–2]. Содержанием цифрового конструкторско-технологического обеспечения подготовки производства являются: проектирование и моделирование в 3D-формате, автоматизированная технологическая поддержка и инжиниринговый анализ отдельных изделий и всей конструкции [3–6].

Топологический инжиниринг (CAO) как составная часть цифрового проектирования реализует стратегию определения геометрии изделия, при которой для несущих нагрузку зон путем перераспределения материала и уменьшения ее массы обеспечивается сохранение прочностных характеристик. Использование деталей с оптимизированной формой актуально для машиностроительной и автомобилестроительной отраслей, где важно сохранение функционала изделия с одновременным снижением массы.

Изготовление сложной по геометрии оптимизированной детали целесообразно в больших партиях при применении методов литья и штамповки. Для малого и среднего предпринимательства характерно мелкосерийное, единичное и позаказное производство. С внедрением аддитивных технологий, связанных с послойным созданием объектов, а не удалением или перераспределением материала, становится целесообразно развивать это направление для изготовления как единичных, так и малых партии деталей сложной топологии. Достигается это за счет быстрого переналадки оборудования, снижения числа технологических операций и других факторов.

Покажем бизнес-процесс CAO инжиниринга на примере детали «Уголок основания», использующейся в настольном 3D-принтере по технологии FDM как связующий элемент основания и направляющих принтера (рис. 1). Технология печати FDM применяется как при прототипировании, так и в промышленном производстве с материалами ABS, PLA, HIPS, SBS, PVA.

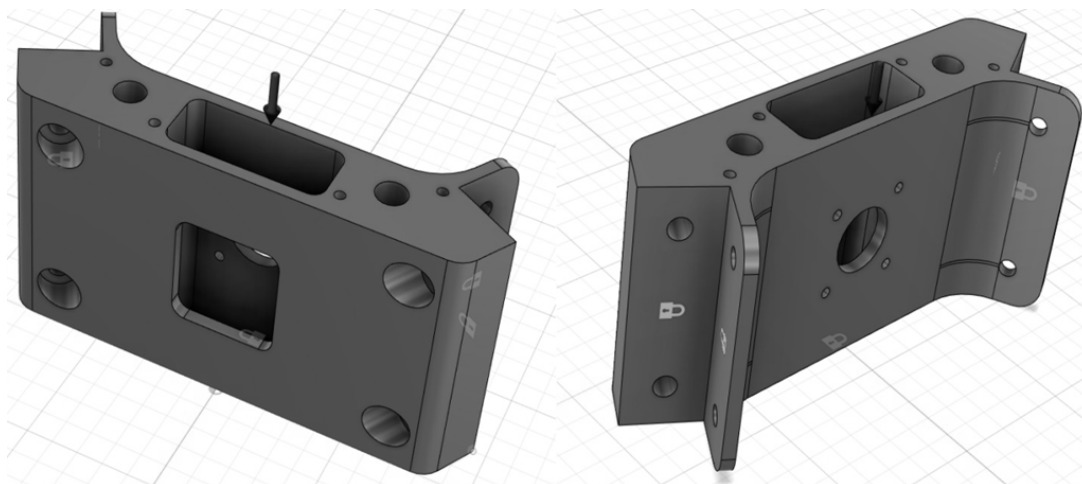


Рис. 1. Деталь «Уголок основания» (исходная конфигурация)

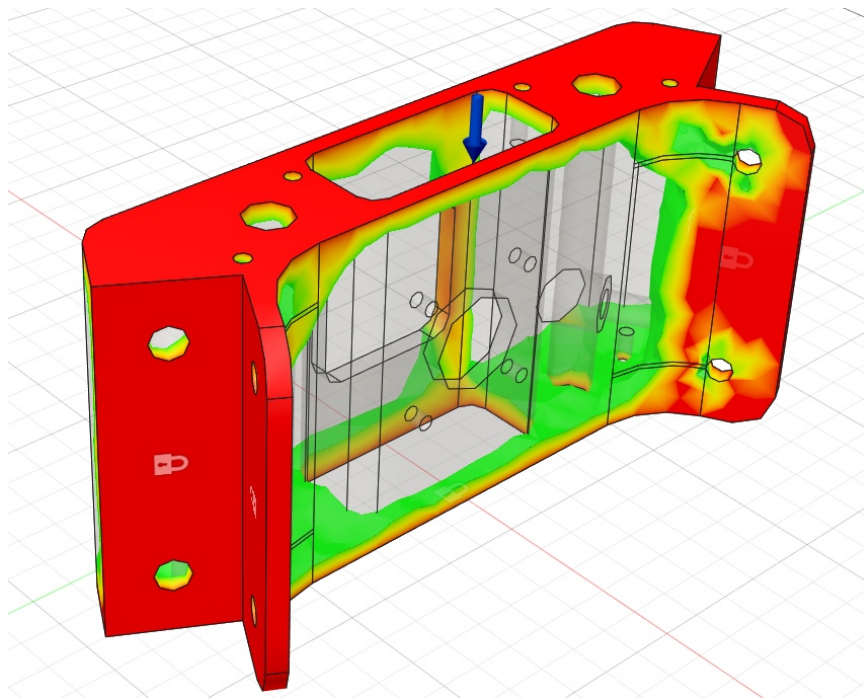


Рис. 2. Результат оптимизации для некорректного указания базовых поверхностей

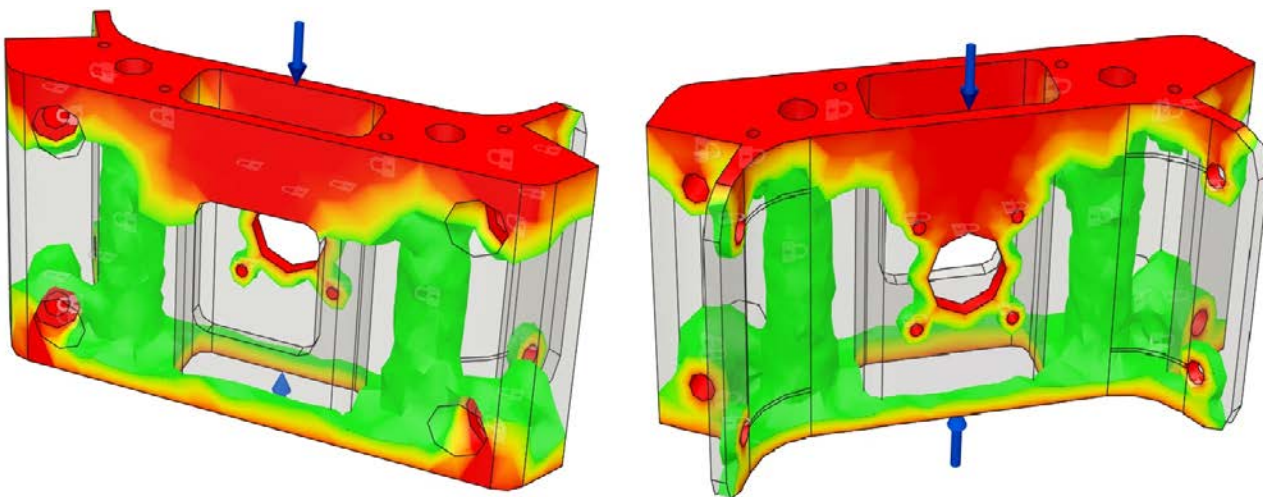


Рис. 3. Корректное решение топологической оптимизации

Цифровой прототип изделия может быть создан в любой CAD-платформе [3–6] и импортирован, с использованием универсальных форматов, из других программных продуктов. CAD-платформа распределит материал в объеме исходной детали по заданным поверхностям. Применяв опцию «оптимизация формы» к исходной конфигурации детали, требуется указать базовые и крепежные поверхности детали, а также выбрать процентное соотношение массы оптимизированной детали к исходной. При попытке получить слишком легкую деталь, решений, которые могли бы обеспечить сохранение функционала получаемой детали, может и не быть. В случаях неверного указания необходимых поверхностей материал не будет распределен на требуемые поверхности (рис. 2). Здесь зона в центре детали, предназначенная для доступа к шаговому электродвигателю, и его крепления

не заполнены материалом, а периферийные области конструктива остались без изменений.

В случае верного указания необходимых поверхностей, отверстий и процентного соотношения массы можно получить несколько вариантов решений топологического инжиниринга, одно из которых представлено на рисунке 3. Новый конструктив представляет собой результат оптимизации при соотношении масс  $\approx 40\%$ . Если полученное решение удовлетворяет конструкторскому заданию, то найденный результат формируется как математическая модель на сетке конечных элементов, что предполагает операции дальнейшего сглаживания. Этот результат топологической оптимизации не является итоговым, и окончательную геометрию изделия корректирует разработчик. Дискретизированная (оптимизированная) и сглаженная (отредактированная) 3D-модели детали представлены на рисунке 4.

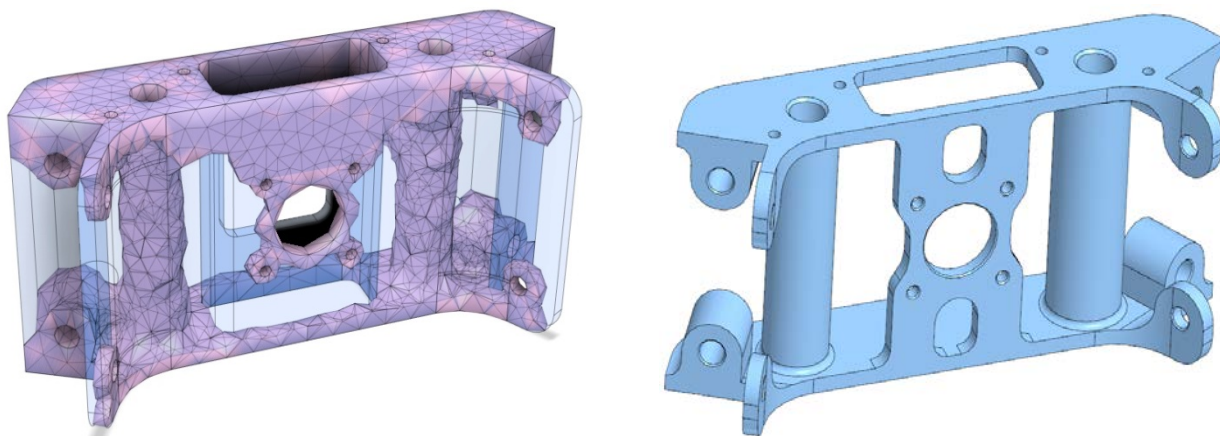


Рис. 4. Цифровой двойник оптимизированной и сглаженной детали

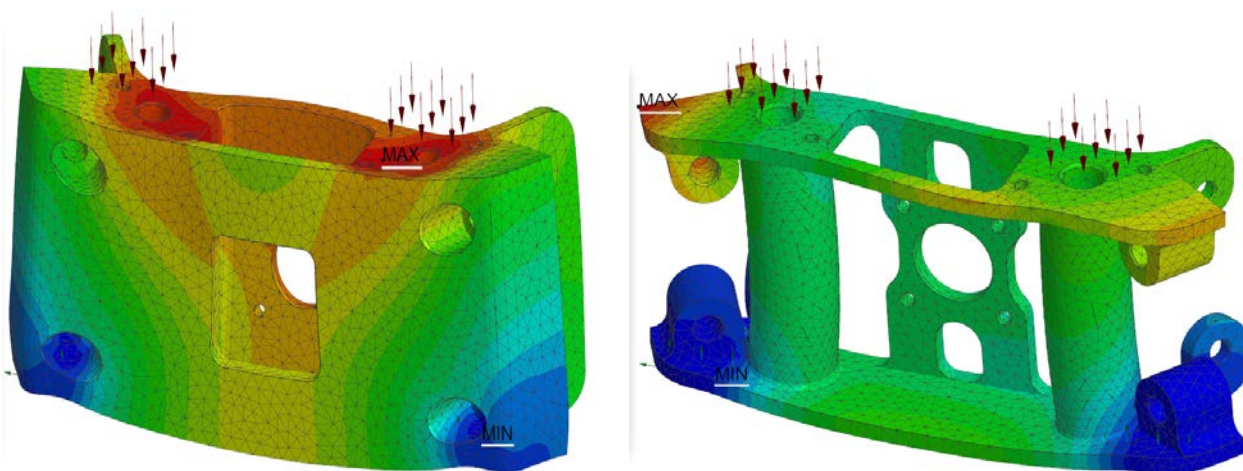


Рис. 5. Характер перемещений в неоптимизированной и оптимизированной детали

Получив готовую форму детали, необходимо удостовериться, что данное изделие способно обеспечить работоспособность всего устройства с учетом воздействующих на него нагрузок. Этот функционал обеспечивает CAE-приложение [5, 7, 8]. Основная нагрузка, воздействующая на деталь, в статике – это вес верхней части принтера, приложенный к поверхности уголка через держатели направляющих. В процессе работы к этому виду силового воздействия следует добавить переменную составляющую (для простоты можно принять низкочастотный гармонический закон этого усилия), обусловленную наличием движущихся элементов в конструкции.

CAE-анализ детали предполагает задание нагрузки на площадках крепления держателей направляющих. Принимая постоянную составляющую в 30 Н, а переменную как  $3\sin(3t)$  Н и распределяя по площади в контактных зонах, проводим с прочностной расчет [7, 8]. Материал изделия (HIPS) выбирается (один из вариантов при проектировании), исходя из механических и экологических требований.

Максимальное перемещение неоптимизированной детали составляет 0,12 мм, а оптимизированной

детали – 0,35 мм, что является допустимым, учитывая условия эксплуатации. При этом максимальные перемещения неоптимизированной детали принтера соответствуют наиболее уязвимым местам деталей. В этом случае смещения сконцентрированы в центре изделия, так как здесь обнаруживается наименее жесткая часть конструкции. А в случае оптимизированного изделия наибольшие смещения при нагрузке сосредоточены на крайних верхних поверхностях детали. Визуализация анализа детали до оптимизации и после, с учетом масштабного коэффициента представлена на рисунке 5 [7], при соотношении масс 58 %.

Для получения финальной формы изделия в производственных условиях целесообразно применять литье (серийное производство) или аддитивные технологии (мелкосерийное производство).

Цифровая сборка настольного 3D-принтера с исходным и оптимизированным креплением основания представлена на рисунке 6. Новое решение обладает аналогичными эксплуатационными качествами, но отличается меньшей материалоемкостью.

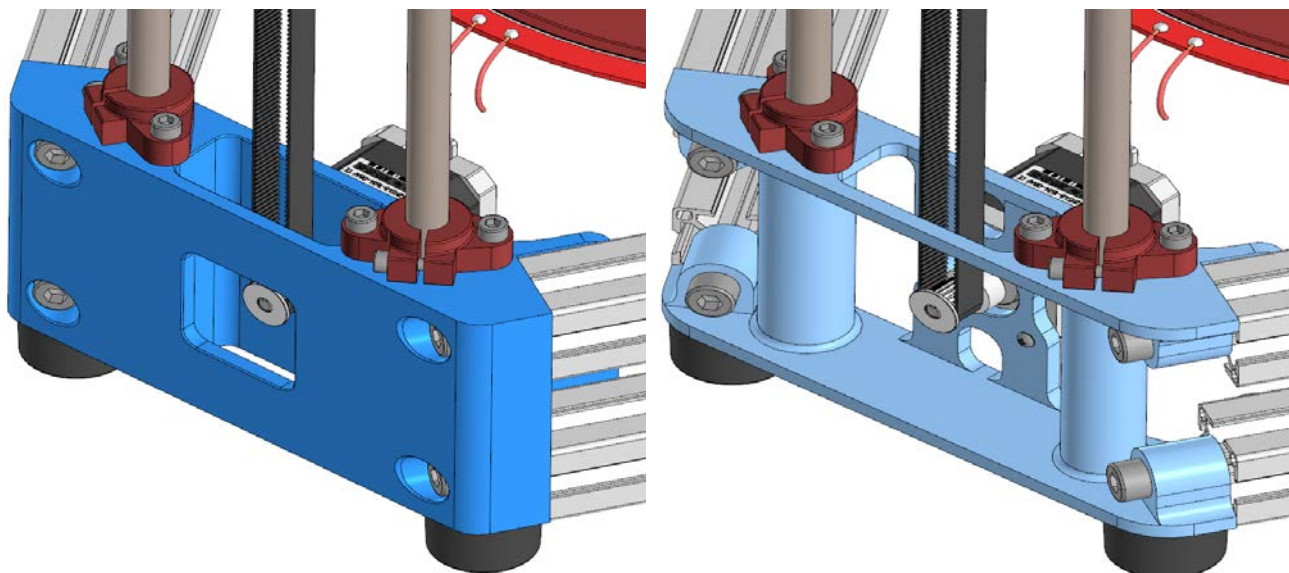


Рис. 6. Результат изменений в конструкции 3D-принтера

Новые технологические вызовы определяют направление в развитии производства, отвечают росту конкурентоспособности и качества продукции, приводят к ускоренному выпуску новых видов изделий. Проникновение цифровых технологий в деятельность малых машиностроительных предприятий находит отражение во внедрении и активном использовании CAD/CAM/CAE/CAO-, MES-платформ. Рост компетенций разработчиков позволяет проектировать оборудование и приборы, отличающиеся пониженными значениями энергоемкости и материалоемкости, с высокими эргономическими показателями. Использование высокотехнологичных программных платформ характеризует тенденцию появления производств с цифровым сопровождением, что приводит к росту производительности труда и повышению потребительских свойств товаров и услуг.

### Литература

1. Боровков, А. О дорожной карте «Технет» (передовые производственные технологии) национальной технологической инициативы / А. Боровков, Ю. Рябов // Двигатели для гражданской авиации. – 2017. – № 10. – С. 8–11. – URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/04\\_april/13/Korporativnyy\\_jurnal\\_Tramplin\\_k\\_uspehu\\_10\\_2017\\_O\\_Technet\\_Nti.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/04_april/13/Korporativnyy_jurnal_Tramplin_k_uspehu_10_2017_O_Technet_Nti.pdf) (дата обращения: 12.03.2021). – Текст : электронный.
2. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии // Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления «Сколково», ноябрь 2017. – URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11\\_november/17/tsifrovoe\\_proi](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proi)

zvodstvo\_112017.pdf (дата обращения: 6.11. 2019). – Текст : электронный.

3. Булавин, В. Ф. PLM-стратегия в мелкосерийном производстве машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, В. А. Глазков. – doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-37-49 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 8. – С. 37–49.
4. Булавин, В. Ф. Политика цифровых технологий на малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, А. С. Степанов. – doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-35-45 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 9. – С. 35–45.
5. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Часть 1. Конструкторский этап / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев, А. С. Степанов. – doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-157-166 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 1–8.
6. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Часть 2. Технологический этап / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев, А. С. Степанов. – doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-167-172 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 9–15.
7. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в Solid Works Simulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.
8. Digital support of production small business preparation in engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, C. A. Stepanov, A. A. Frolov, V. V. Yahrchev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399, Issue. – P. 033045.

**I.S. Petryashov, V.F. Bulavin**  
Vologda State University

### **ENGINEERING SUPPORT IN SMALL ENTERPRISES**

The machine-building sector of the North-West region is consistently implementing digital technologies based on CAD products. The integrated application of the CAD/CAM/CAPP/CAE ideology is in its infancy, although its individual components are widely used in enterprises at all levels. The article discusses the results of the formation of competencies in the field of CAE/CAD design, which combine advanced production technologies and business models for their dissemination in the sphere of small and medium-sized machine-building enterprises. The production of products for markets with new qualities and the creation of high-tech areas in the industry lead to the production of globally competitive products.

Digital design, topological engineering, optimization, digital twin, small machine-building enterprise.