

### 1.3. ГЕНЕРАТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

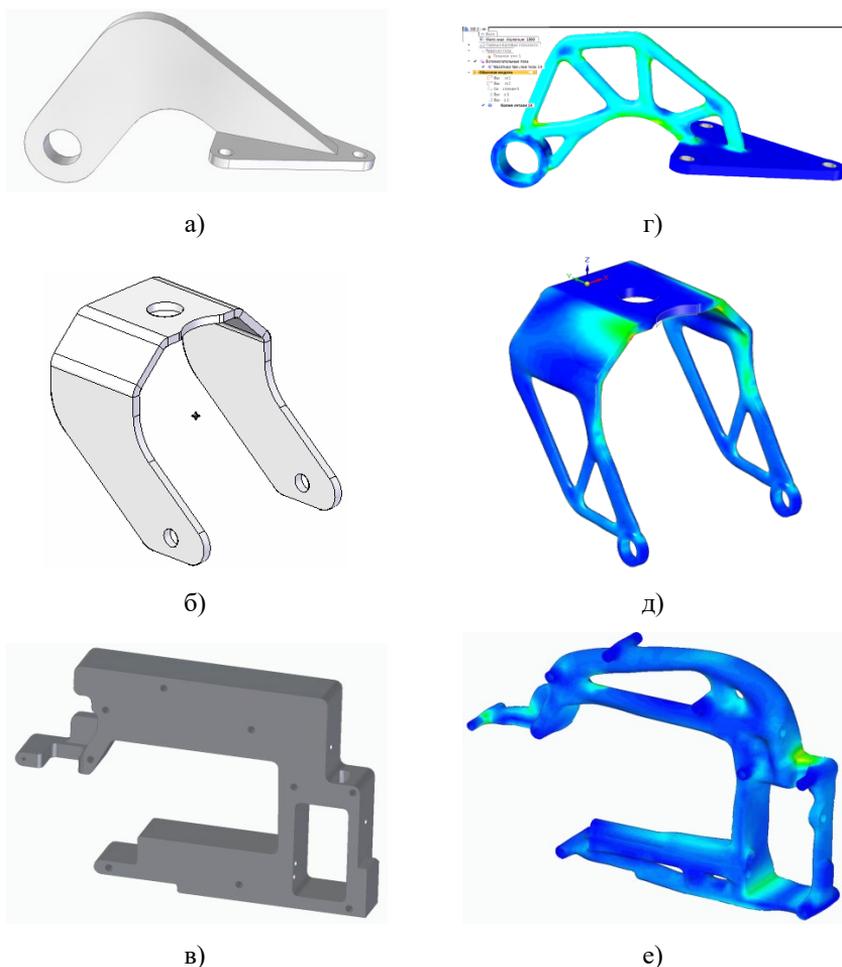
**Цель лекции:** изучение методов генераторного проектирования.

В настоящее время активно развивается концепция т.н. объединенного моделирования (Convergent Modeling), в рамках которой происходит совместная практически «бесшовная» работа над конструкторскими моделями, оформленными в виде твердотельной и фасетной геометрии. Составляющие данной концепции, приведенные на рис. 1.8, будут последовательно рассмотрены в курсе лекций и практических занятий.



**Рис. 1.8.** Концепция объединенного моделирования (Convergent Modeling)

Одной из важных составляющих концепции объединенного моделирования является генеративное проектирование (англ. Generative Design). Модуль генеративного проектирования (другие наименования – топологическая оптимизация, бионический дизайн), позволяет автоматически создать деталь минимальной массы с одновременным выполнением требований к прочности и достижением формы, пригодной для изготовления как аддитивными (3D-печать), так и традиционными субтрактивными (литье, штамповка, фрезерование, сверление и пр.) методами формообразования, что повышает показатели эффективности конечного изделия и сокращает расходы на материалы. В результате в общем случае получается деталь «органической» формы, представляющая собой фасетную модель. Примеры полученных с помощью генеративного анализа форм деталей приведены на рис. 1.9.



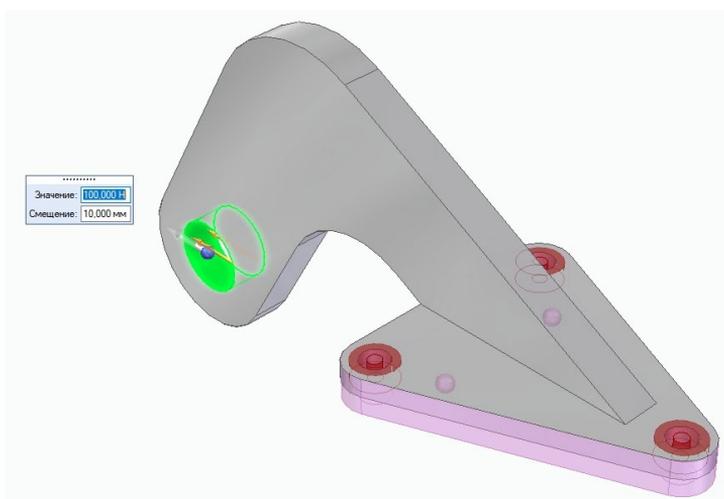
**Рис. 1.9.** Примеры форм деталей, полученных в результате генеративного проектирования: исходная модель (а, б, в); модель как результат генеративного анализа с показом эпюры напряжений (г, д, е)

Рассмотрим возможности данной технологии проектирования на примере модуля Generative Design Pro из спецификации САПР Solid Edge. С помощью данного модуля возможно задавать несколько генеративных анализов в документе детали, использовать полученную геометрию в дальнейших целях объединенного моделирования – в частности, обратного инжиниринга или 3D печати.

Также следует отметить, что полученную модель конструктор может использовать как отправную точку для дальнейших изысканий, выстраивая обычную твердотельную (B-REP) 3D-модель, исходя из рекомендаций и направлений совершенствования формы и минимизации массы, предложен-

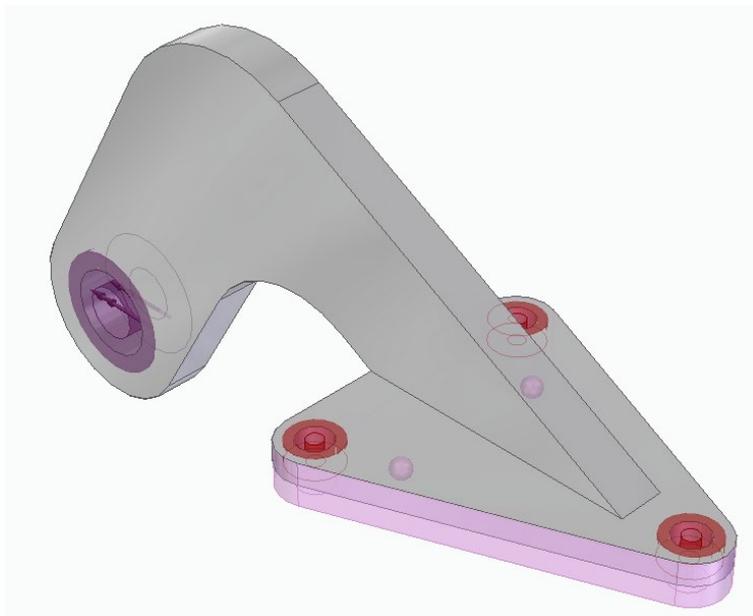
ных в фасетной модели по результатам генеративного проектирования. Структурная оптимизация лучше всего подходит для анализа начальной, базовой геометрии с минимальным числом конструктивных элементов. Чтобы иметь возможность использовать полученную фасетную модель в дальнейшем конструкторском проектировании, ее следует предварительно открепить от генеративного анализа.

Задание генеративного анализа во многом соответствует вводу исходных данных статического анализа прочности (см. рис. 1.10). Должен быть задан материал детали (непосредственно в анализе либо как материал конструкторской модели), механические нагрузки (доступны: сила, давление, крутящий момент, сила тяжести) и ограничения (доступны: зафиксировать, запретить перемещение, применить перемещение).



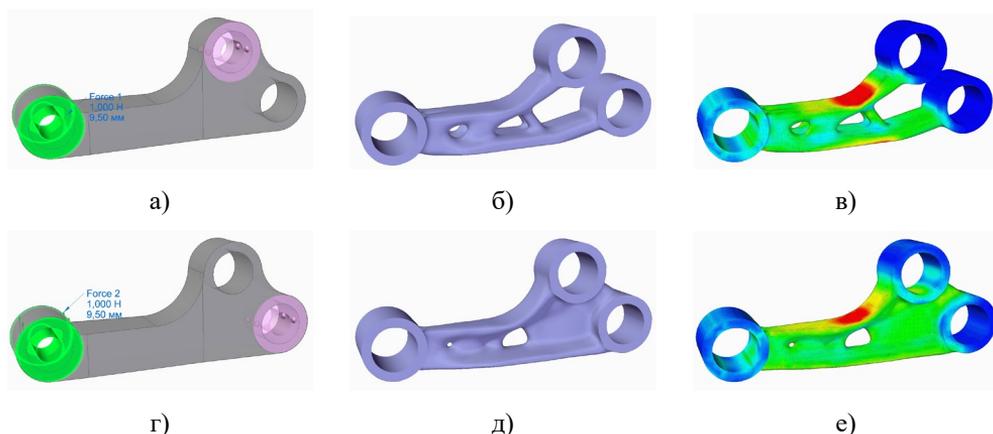
**Рис. 1.10.** Задание нагрузки «Сила»

Отличием от традиционного инженерного анализа является, в частности, возможность задать неизменяемые области (см. рис. 1.11), которые не претерпят изменений в результате оптимизации – это, как правило, крепежные отверстия, поверхности прилегания и сопряжения с другими деталями в сборке, иная неизменяемая геометрия. Геометрия неизменяемых областей не претерпевает изменения в результате анализа и не затрагивается процедурами формообразования и изъятия геометрии в целях сокращения массы. Неизменяемые области также автоматически формируются при задании нагрузок и закреплений на заданную конструктором глубину по нормали к поверхности приложения нагрузки/закрепления (см. рис. 1.10, параметр «Смещение»).



**Рис. 1.11.** Задание неизменяемых областей – области основания кронштейна (задана закреплением), области большого отверстия (задана нагрузкой), области крепежных отверстий основания (заданы отдельно командой («Неизменяемая область»))

Возможно рассмотреть несколько случаев нагружения, что позволяет реализовать оптимизации по разным сценариям с использованием различных нагрузок / ограничений, набранных из общей коллекции. Например, приведенные на рис. 1.12 два случая нагружения одной детали отличаются направлением приложенной силы и различными закрепленными гранями. Результаты топологической оптимизации, полученные для каждого из случаев, также различаются. Такой подход позволяет проанализировать поведение детали в различных условиях нагружения и выработать подходы к оптимизации ее геометрии, учитывающие данные варианты.



**Рис. 1.12.** Исходные данные и результаты генеративного анализ двух случаев нагружения, различавшихся направлением приложенной силы и закрепленными гранями: случай 1 (а, б в); случай 2 (г, д, е)

Требуемое снижение массы задается целевым значением массы, процентом ее уменьшения либо выполняется на основе задания коэффициента запаса прочности – отношения предела текучести материала детали к максимальным допустимым напряжениям в модели. Также задается качество анализа в относительных единицах. Повышение качества анализа улучшает точность и сбалансированность результатов, но увеличивает время анализа (см. рис. 1.13).

Выполнить анализ

Качество анализа

Низкое  Высокое

Грубая оценка времени анализа: 0 ч., 2 мин., 58 сек.

Уменьшение массы

Процент уменьшения  Использовать коэффициент запаса прочности

5%  95%

Исходная масса:  3,313 кг

Конечная масса:  2,650 кг

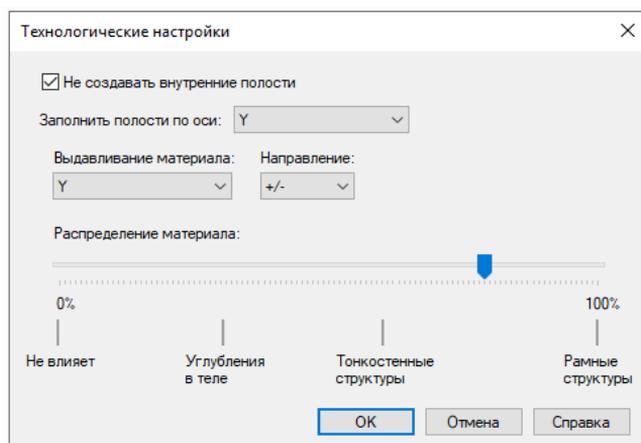
Предел текучести:  27,579 МПа / Запас прочности:  1,500 = Допустимое напряжение:  18,386 МПа

Отображение результатов

Скрыть область проектирования при отображении результатов

**Рис. 1.13.** Настройки выполнения анализа – качество и уменьшение массы

Технологические настройки позволяют управлять формой получаемой оптимизированной детали. Окно настройки технологических параметров приведено на рис. 1.14.

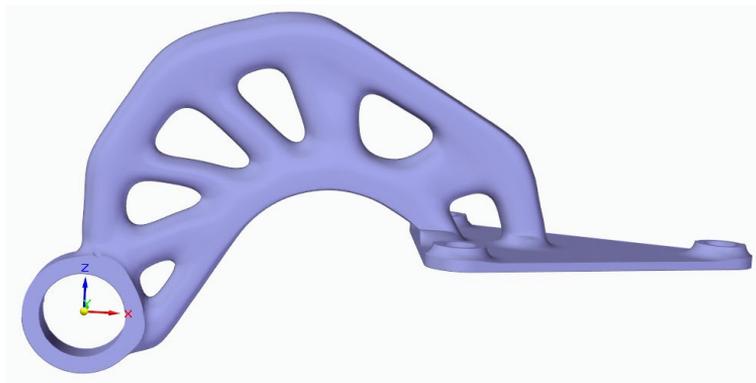


**Рис. 1.14.** Технологические настройки генеративного проектирования

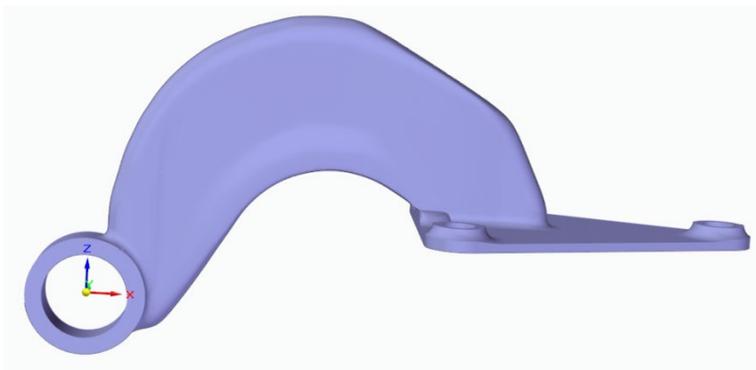
Задавая различные технологические настройки генерации формы, можно, например, заполнить полости по какой-либо оси, устранив провисание материала (рис. 1.15, б), получить результат, пригодный для традиционных субтрактивных (рис. 1.15, в, г) либо перспективных аддитивных (рис. 1.15, а) способов изготовления деталей. Результат на рис. 1.15, в, г получен при настройках, которые обеспечивают получение перпендикулярно заданной оси одной (в положительном или отрицательном направлении) либо двух (в обоих направлениях) поверхностей, обрабатываемых традиционными методами (литьем, фрезерованием и т.д.).

Помимо этого, с помощью технологических настроек можно управлять распределением материала в оптимизированной модели – например, формирование модели будет происходить созданием углублений, тонкостенных и рамных структур, опор (см. рис. 1.16).

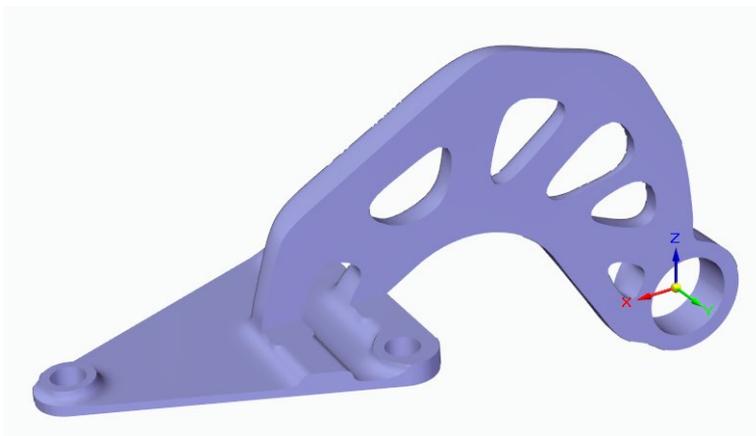
Результатом генеративного анализа является графический вывод эпюры напряжений (без возможности оценки количественных значений полученных напряжений, см. рис. 1.17). Тем не менее, эпюра позволяет определить критичные области максимальных напряжений в модели.



a)



б)



в)

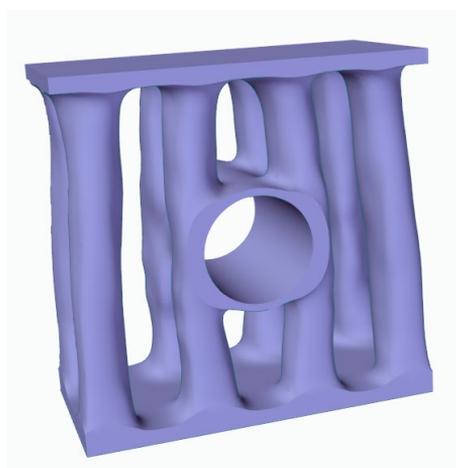


г)

**Рис. 1.15.** Результат применения различных технологических настроек: с исходными настройками (а); с заполнением полостей по оси Z (б); с выдавливанием материала в положительном направлении по оси Y (в); с выдавливанием материала в обоих направлениях по оси Y (г)

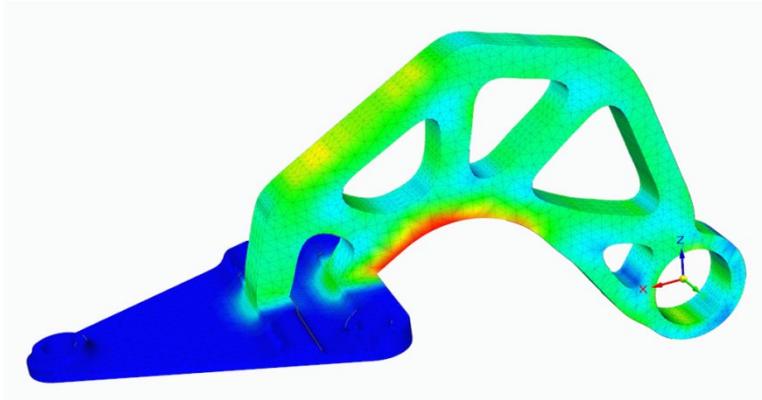


а)



б)

**Рис. 1.16.** Управление распределением материала при помощи технологических настроек: распределение материала не влияет на форму модели (а); в модели создаются рамные структуры (б)



**Рис. 1.17.** Эпюра напряжений модели, сгенерированной методом генеративного проектирования. Область красного цвета отражает наибольшие напряжения в модели

Существующая утилита пакетного запуска генеративного анализа на основе API обеспечивает выполнение анализа вне рабочего времени и может быть доработана пользователями.

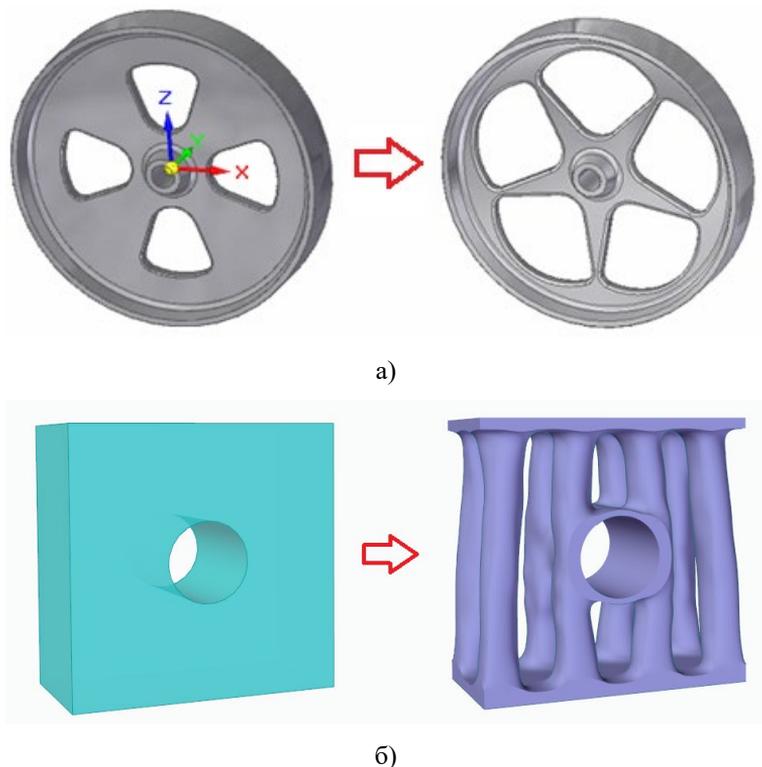
Остановимся на сходствах и отличиях в задании исходных данных и результатах оптимизации, выполняемой в модуле генеративного проектирования и модуле классического инженерного анализа Solid Edge Simulation.

Главным отличием является то, что однокритериальная оптимизация конструкции, выполняемая в модуле Solid Edge Simulation, для достижения поставленной цели (в обоих случаях – минимизация массы) изменяет параметрическую модель (геометрические размеры детали в соответствии с заданным набором проектных переменных и диапазонов их изменения), не изменяя при этом структуру или топологию модели.

Структурная оптимизация, выполняемая в модуле генеративного проектирования, в свою очередь, не требует задания проектных переменных, но при этом реально изменяет форму и структуру модели – зачастую радикальным образом. В результате могут получаться структуры, напоминающие скелетные (древовидные), что принципиально невозможно при обычной параметрической оптимизации. Сравнение подходов представлено на рис. 1.18.

Результатом структурной оптимизации является фасетное тело, а результатом оптимизации конструкции – твердое тело.

Оба типа оптимизаций минимизируют массу, но в модуле генеративного проектирования можно задать только один вид ограничений – на максимально допустимые напряжения, возникающие в модели (непосредственно либо через задание коэффициента запаса прочности). Обычная оптимизация позволяет учесть набор произвольных ограничений на геометрию и физические параметры модели.



**Рис. 1.18.** Сравнение результатов классической параметрической (размерной) оптимизации (а) и структурной оптимизации при генеративном проектировании (б)

Нагрузки и ограничения используются в обоих типах оптимизаций и применяются с помощью похожих команд, при этом модуль генеративного проектирования обладает меньшим набором доступных типов нагрузок/ограничений.

При структурной оптимизации используются входные данные, которые не задаются при параметрической конструкции, в частности, задание областей модели и конструктивных элементов (например, отверстий), которые не должны изменяться в процессе оптимизации, а также желаемый процент уменьшения массы.

### Тесты к лекции 3

1. Чем отличается задание параметров генеративного анализа и анализа статического нагружения?

- а) задание параметров этих анализов выполняется аналогично;
- б) в генеративном анализе задаются неизменяемые области;
- в) набор возможных видов нагрузок в генеративном анализе шире, чем в статическом анализе.

2. В результате генеративного проектирования получается...
  - а) BREP-модель;
  - б) фасетная модель;
  - в) фасетная модель с отдельными BREP-элементами.
3. Чтобы воспользоваться результатами генеративного анализа, полученную модель необходимо:
  - а) вычесть из исходного тела-заготовки с помощью булевой операции;
  - б) дополнительных действий не требуется;
  - в) открепить от анализа с помощью соответствующей команды.
4. Технологические настройки генеративного проектирования позволяют:
  - а) создать модель, пригодную к производству аддитивными методами формообразования;
  - б) создать модель, пригодную к производству традиционными методами формообразования;
  - в) создать модель, пригодную к производству аддитивными либо традиционными методами формообразования, в зависимости от настроек.
5. В чем отличие однокритериальной параметрической и топологической (структурной) оптимизации? (Выберите один или больше правильных ответов.)
  - а) однокритериальная оптимизация изменяет параметрическую модель, не изменяя структуру (топологию) модели;
  - б) структурная оптимизация не требует задания проектных переменных, но при этом реально изменяет форму и структуру модели;
  - в) в результате структурной оптимизации формируется многотельная модель, каждое тело которой отражает итерацию изменения структуры.