

## ПОЛУЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНА С «ТЭЙЛОР» – СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ

Полькин И.С. (ОАО ВИЛС),

Бураго Н.Г. (ИПМех РАН)

Никитин И.С. (РГТУ – МАТИ им. К. Э. Циолковского),

В работе рассмотрена технология послойного наплавления гранул методом электронно-лучевой плавки с целью создания в различных участках детали заранее запрограммированной структуры, которая создает возможность получения определенного уровня механических свойств, необходимых для сопротивления напряжениям, возникающим в этих участках, причем уровень напряжений в детали при эксплуатации предварительно рассчитывается. Созданную таким образом композитную структуру в различных зонах детали можно назвать «тэйлор»–структурой, структурой скроенной по «заказу».

Ключевые слова: гранулы, электроннолучевая плавка, технология сложением, «тэйлор»– структура и свойства.

Повышение свойств конструкционных материалов всегда было в центре внимания исследователей и создателей новой техники. За прошедшие десятилетия проведен большой объем исследований комплексного легирования и последующих 3-4- ступенчатых режимов термической обработки основных конструкционных материалов; предложены сложные технологические схемы, позволяющие получать сверхмелкое зерно и ряд других достаточно прогнозируемых способов, значительно повышающих механические свойства материалов. Вместе с тем получаемые эффекты по повышению только прочностных и пластических свойств все меньше стали удовлетворять конструкторов. Это заставило исследователей искать способы повышения комплекса конструкционных свойств создаваемых материалов, среди которых следует упомянуть исследования по избирательному повышению жаропрочности, усталости, модуля упругости и др. Большое внимание уделяется широкому спектру способов получения сплавов с матричной наноструктурой, которая, однако, пока в силу её нестабильности не может найти применения в конструкционных деталях, работающих в сложных условиях. Большое количество работ в последнее время направлено на развитие

принципиально новых технологий производства конструкционных деталей, различных способов спекания и трения, таких как плазменные, газодинамические процессы.

Среди проводимых с этой целью исследований следует уделить особое внимание направлению работ по симуляции напряжений, возникающих в конкретной детали в условиях эксплуатации, знание которых позволит грамотно выбрать сплав, уровень прочности и структуру, чтобы изделие могло надежно эксплуатироваться и сопротивляться разрушению при реально возникающих напряжениях. Создание программ и методов расчёта возникающих напряжений в детали открывают перед металлургами возможности по созданию необходимой структуры и свойств в конкретных ее участках, и это позволит значительно повысить эксплуатационные свойства не просто сплава, а готовой детали.

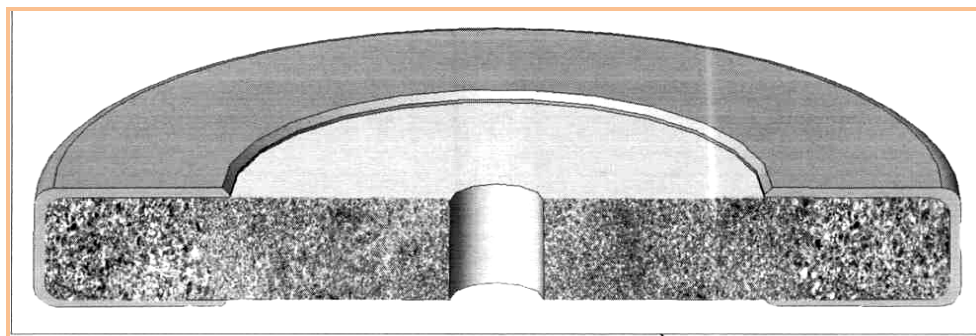
Получение требуемых свойств и структур в конкретных участках детали вполне может быть названо работой по созданию «тэйлор»–свойств. Слово «тэйлор» происходит от английского «портной» и в металлургии его можно использовать, чтобы показать задачи металлургов по получению требуемой структуры и свойств в различных частях детали по определенному «заказу» в зависимости от возникающих в них напряжений.

Существует ряд способов получения различных типов структур и свойств в одной детали. Наиболее известным является локальная термическая обработка, позволяющая за счёт изменения температуры и скорости охлаждения в различных участках детали управлять структурными параметрами. Известны также методы локальной деформации одной детали, например, дополнительная осадка только ободной части диска, обработка поверхности детали дробью или энергетическими потоками с высокой плотностью энергии.

Наиболее широкие возможности открывает порошковая металлургия.

Порошок или гранулы различной крупности и структуры засыпают в специально сконструированные капсулы и подвергают горячему

изостатическому прессованию. На рис. 1 [1] представлен диск, изготовленный по этой схеме в ВИЛСе.

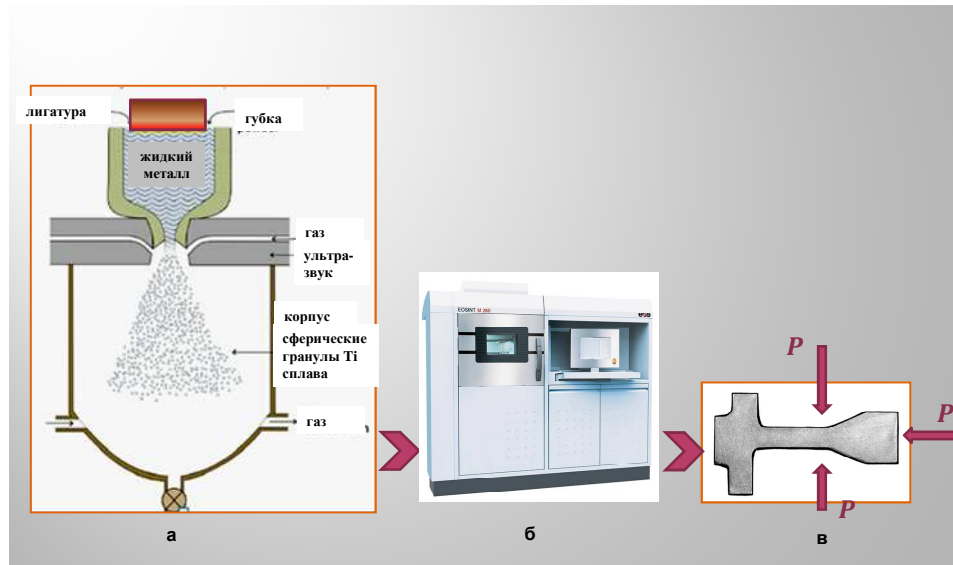


*Рис. 1. Макроструктура осевого темплета модельной заготовки диска, полученной из гранул с разной структурой*

Однако наибольшую перспективу при создании деталей с программированной структурой и свойствами имеют технологии послойного наплавления порошков методами электронно-лучевой плавки и additive manufacturing – технологии сложения [2].

Технология послойного наплавления предполагает, что любой трехмерный объект может быть построен эффективно и быстро без какой-либо оснастки и сложной подготовки управляющих программ, необходимо только наличие трехмерного файла детали. Во время построения трехмерная модель разбивается на слои. Затем технология послойного наплавления воспроизводит требуемую геометрию деталей по слоям. С помощью энергии электронного луча происходит спекание порошковых частиц из выбранного сплава.

В технологии «сложения» (рис. 2) весь процесс состоит в основном из трех операций: получение гранул, формовка детали в установке методом электронно-лучевой послойной плавки и финишной обработки детали. При этом на рис. 2 показан процесс получения гранул из расплава губки и легирующих элементов, который является наиболее экономичным, несмотря на существование других способов.



*Рис. 2. Технология получения деталей сложной формы «сложением»  
КИМ 85 – 90 %:*

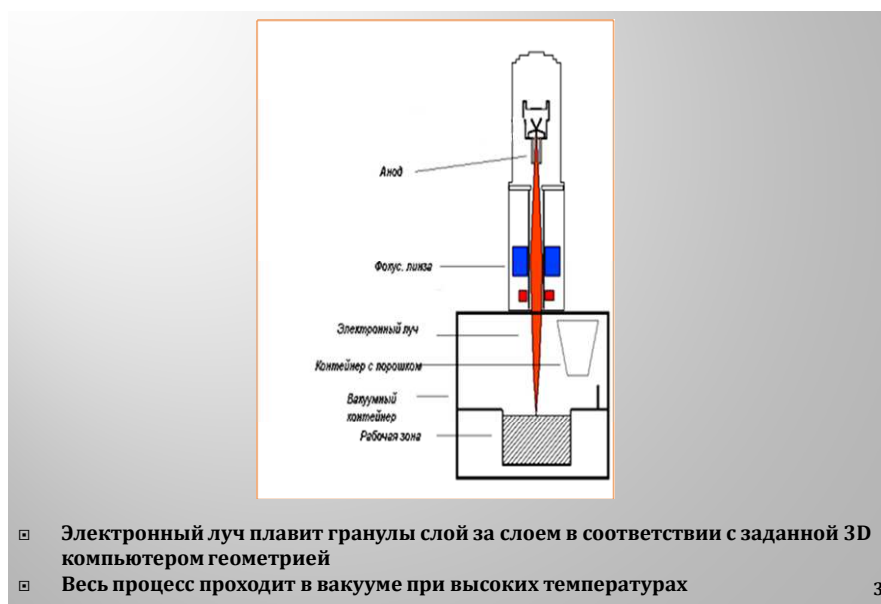
*а – получение гранул из титановых сплавов;*

*б – установка по формовке детали методом ЭЛП (EOSINTM280);*

*в – ГИП готовой детали*

Полученные гранулы насыпают в установку электронно-лучевой плавки (рис. 3) послойно толщиной, соизмеримой нескольким диаметрам одной гранулы. Электронный луч, сканирующий по программе, ранее созданной по модели детали, сплавляет первый слой гранул, соответствующий контуру будущей детали. Затем в рабочую зону поступает новая порция гранул, которые равномерно распределяются над расплавленным слоем также толщиной в несколько диаметров гранул, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет получена окончательная форма детали. Все изготовленные таким способом детали обязательно подвергают горячей газостатической обработке. На рис. 4 показаны некоторые детали авиационного и медицинского назначения, полученные в установке электронно-лучевой плавки. Проведенные работы показывают технические возможности существующих установок по

изготовлению деталей сложной формы за 30 – 40 ч непрерывной работы, без участия «человеческого фактора».



*Рис.3. Получение деталей электронно-лучевой плавкой*



#### **Элемент шасси**

Материал: Ti6Al4V

Вес: 4.5 кг

Время получения: 36 часов



#### **Коленная чашечка**

Материал: Ti Grade 2

Время получения: 4 часа

*Рис.4. Детали из титановых сплавов, полученные методом «сложения» (ЭЛП)*

Задачей металлургов в процессе послойного наплавления является запрограммированное расположение в объёме детали гранул нужного состава с нужной структурой. В настоящей работе расчётным методом было показано, как повысить надёжность и работоспособность детали, используя метод программированного расположения требуемой структуры в объёме детали.

Для простоты расчёта был взят кольцевой диск внешним диаметром 800 мм, со скоростью вращения до 7500 об/мин, в котором посчитаны напряжения, возникающие по радиусу от центра к периферии (рис. 5).

Рис. 5 При расчете на внешнем контуре диска задавались дополнительные, переменные по углу, радиальные напряжения, которые моделировали центробежное воздействие от лопаток и были согласованы с ними по амплитуде.

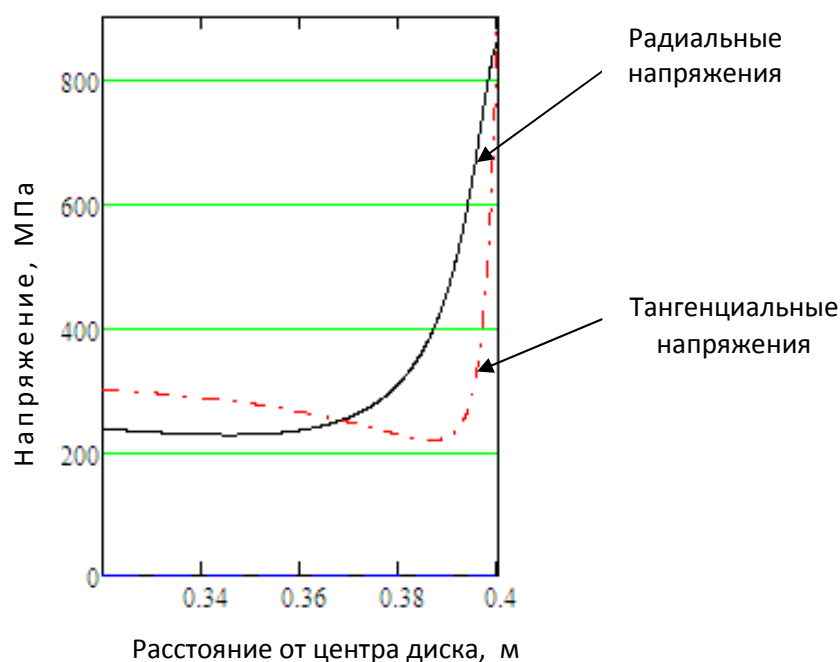


Рис. 5. Изменение радиальных и тангенциальных напряжений по радиусу титанового диска при скорости вращения 7500 об./мин

Из рис.5 следует, что напряжения при вращении диска повышаются от 200 – 300 МПа до 700 – 800 МПа только на периферии диска на расстоянии 10 – 20 мм от края.

На основе критерия многоосного усталостного разрушения Сайнса [3] по напряженному состоянию были получены оценки долговечности (число циклов до разрушения) в каждой точке диска.

Рис. 6 Для полученного уровня напряжений в окрестности обода диска расчёт показал снижение долговечности при испытании образцов на усталость с  $N = 10^8$  циклов до  $N = 10^4$  циклов, что недопустимо для безопасной работы такой детали (см. рис.6).

Рис. 7 Было посчитано необходимое значение уровня предела

выносливости на периферии диска, с целью сохранения долговечности на уровне  $N = 10^8$  циклов (рис. 7).

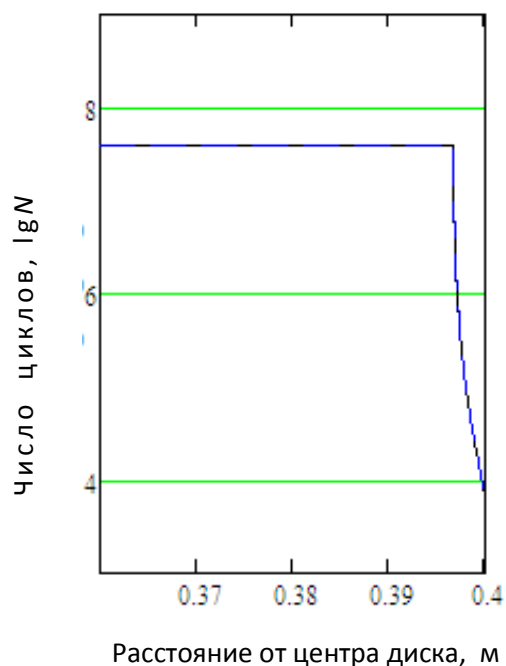


Рис. 6. Изменение логарифма долговечности образцов в зависимости от расстояния от центра диска:

$$\sigma_{-1} = 470 \text{ МПа}; \quad \sigma_s = 1020 \text{ МПа}$$

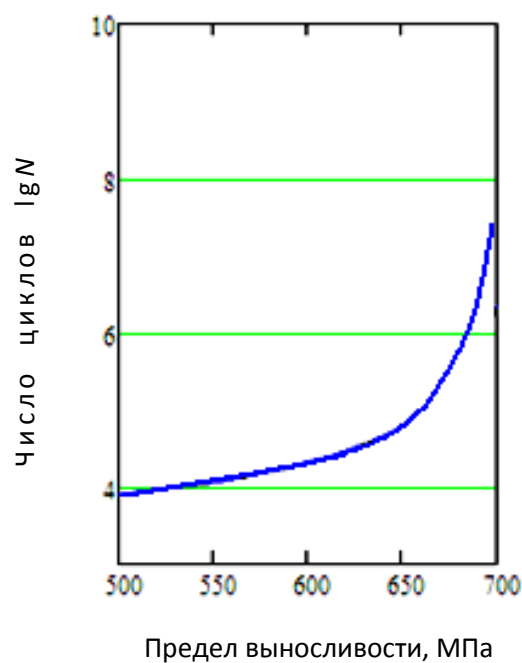


Рис 7. Зависимость логарифма долговечности от предела выносливости образцов у обода диска (расчет)

Из рис.7 следует, что для сохранения такой же, как и в центре, долговечности на периферии диска должен быть обеспечен предел выносливости 700 МПа. Для обеспечения долговечности  $10^8$  циклов в центре диска достаточно предела выносливости 400 МПа, тогда как для сохранения такой же долговечности на периферии, металл должен обладать прочностью, обеспечивающей предел выносливости 700 МПа.

Учитывая, что выше поставленная задача решалась нами для диска из сплава ВТ6, необходимо было создать на периферии такую структуру, которая бы позволяла получить предел выносливости на ободе диска более 700 МПа. Опираясь на существующие зависимости предела выносливости от временного сопротивления разрыву [4] была выбрана структура, обеспечивающая необходимый уровень выносливости при испытании образцов на долговечность.

Рис. 8

Указанный предел выносливости для сплава ВТ6 может быть получен на образцах с повышенной прочностью и достаточно дисперсной структурой. Исходя из вышеизложенного, микроструктура диска для обеспечения предела выносливости  $N = 10^8$  по всему сечению должна иметь вид, представленный на рис. 8: глобулярно-пластинчатая в центре и мелкодисперсная на ободе диска.

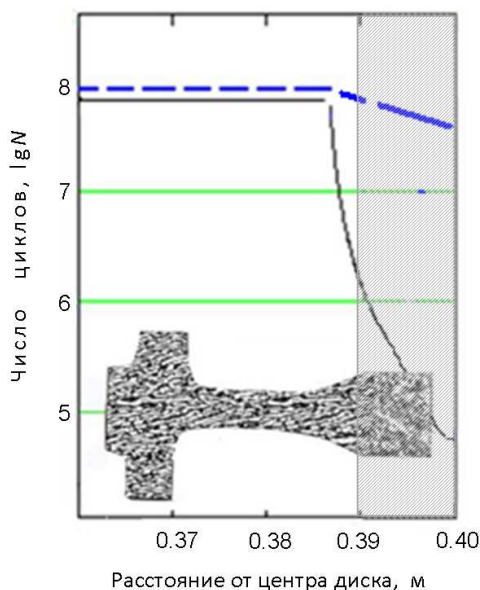


Рис. 8. Модельный диск с «тэйлор» – структурой по сечению



Таким образом, способ компоновки структуры в детали «по заказу» с целью обеспечения необходимых свойств для сопротивления возникающим напряжениям можно назвать способом создания «тэйлор»–структуры.

Как было сказано выше, из известных способов её создания следует предпочесть порошковую технологию и наиболее перспективным является метод «электронно-лучевой плавки» или так называемый метод «сложения» (additive manufacturing).

Развитие техники «электронно-лучевой плавки» (EBM) в настоящее время дает возможность получать детали длиной до 2 м, иметь несколько источников энергии и контейнеров с гранулами с разной структурой и химическим составом.

Получение деталей с регламентированной структурой по сечению, безусловно, обеспечит их повышенную работоспособность. В полной мере оценить этот эффект лучше всего можно при натурном испытании детали. Вместе с тем уже были получены результаты испытания образцов с переменной структурой, которые показали преимущества по комплексу свойств как перед образцами со структурой, повышающей только усталостные свойства, так и перед образцами со структурой, повышающей только жаропрочность [1, 2].

Таким образом, изготовление деталей с заранее запрограммированной структурой в различных ее частях с учетом напряжений, возникающих в ней в условиях эксплуатации, открывает пути создания нового класса конструкционных деталей из алюминиевых, титановых и жаропрочных материалов с повышенными характеристиками работоспособности.

#### Литература:

1. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. и др. Исследование возможности изготовления дисков ГТД с переменной структурой и функционально-градиентными свойствами из гранул разных фракций. Технология легких сплавов. 2011. №4. С. 41-50.
2. Полькин И.С. Перспективы развития гранульной металлургии титановых сплавов. Технология легких сплавов. 2011. № 4. С. 5-11.

3. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций.// Изв. РАН. МТТ. 2011. №6. С. 22-33.
4. Ильин А.А., Скворцова С.В., Спектор В.С. и др. Взаимосвязь структуры и комплекса механических свойств в титановом сплаве ВТ6. Титан. 2011. № 1. С. 26-29.