

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донской государственный технический
университет»**

**ОЛИМПИАДА «Я – БАКАЛАВР»
ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ 5–11 КЛАССОВ
2025/2026 учебный год**

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП

ПО ТЕХНОЛОГИИ

КЛАСС 10

Вариант 2

Задание 1 (20 баллов)

Для серийного производства алюминиевых шпилек М18 необходимо выбрать наиболее эффективный способ изготовления. Сравните два варианта: обработка на токарном станке и литье заготовки. По каким трём критериям вы будете сравнивать эти технологии? Какой способ выберете и почему?

Подробный разбор задания:

Сравнение способов изготовления алюминиевых шпилек М18: токарная обработка из прутка vs литьё заготовки с последующей доработкой

1. Критерии сравнения (3 критерия)

Критерий	Токарная обработка (из прутка)	Литьё заготовки (с последующей мехобработкой)
Производительность и цикл изготовления	Высокая на токарных автоматах (прутковый материал, непрерывный цикл). Время на одну деталь определяется скоростью резания и количеством проходов.	Литьё требует изготовления пресс-формы, времени заливки, кристаллизации и извлечения. Цикл может быть длиннее, но при использовании литья под давлением возможно получение заготовок с высокой скоростью.
Себестоимость и материалоемкость	Значительные потери металла в стружку (до 30–50% от исходного	Минимальные потери материала при литье (безстружковая

Критерий	Токарная обработка (из прутка)	Литьё заготовки (с последующей мехобработкой)
	прутка). Высокий расход инструмента. Низкие затраты на оснастку (токарные патроны, резцы).	технология получения заготовки). Высокие начальные затраты на пресс-форму, но при серийном производстве они быстро окупаются за счёт экономии металла и сокращения времени мехобработки.
Механические свойства и качество	Стабильные механические свойства, определяемые исходным материалом (деформированный полуфабрикат). Высокая точность размеров и чистота поверхности достигается непосредственно на токарном станке.	Механические свойства могут быть ниже из-за литейных дефектов (пористость, рыхлоты), особенно при гравитационном литье. Требуется дополнительная механическая обработка для получения точной резьбы и посадочных поверхностей. Литьё под давлением даёт более качественную структуру, но полностью не устраняет необходимость доработки.

2. Выбор способа

Выбранный способ: токарная обработка из прутка (автоматная продольная токарная обработка).

3. Обоснование выбора

1. Геометрическая сложность шпильки. Шпилька М18 представляет собой крепёжное изделие с наружной резьбой (часто по всей длине или на концах) и, как правило, имеет относительно простую цилиндрическую форму. Такая геометрия идеально адаптирована для токарной обработки на прутковых автоматах, где резьба формируется резьбонакатыванием или нарезанием. Литьё для получения наружной резьбы высокого класса точности

неприменимо — резьба в любом случае требует последующей механической обработки.

2. Серийность и экономическая эффективность. Для серийного производства (сотни и тысячи шпилек) токарная обработка на станках с ЧПУ или токарно-револьверных автоматах обеспечивает:

- минимальное время цикла;
 - отсутствие дорогостоящей литейной оснастки;
 - быстрое переналаживание при изменении типоразмера.
- Литьё требует значительных единовременных затрат на пресс-форму, что экономически оправдано лишь при очень крупных партиях и сложной форме, не характерной для шпилек.

3. Требования к механическим свойствам. Шпильки, как крепёжные изделия, работают на растяжение и сдвиг. Деформированный алюминиевый прут (полученный прокаткой или прессованием) имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с литым материалом той же марки за счёт наклёпа и отсутствия литейных дефектов. Для ответственных крепёжных изделий литая структура менее предпочтительна из-за риска пористости и снижения усталостной прочности.

4. Технологические нюансы. Современная токарная обработка алюминиевых сплавов отличается высокой производительностью благодаря хорошей обрабатываемости (низкие усилия резания, высокая скорость резания, легкость стружколомания). Применение резбонакатывания вместо нарезания позволяет дополнительно повысить прочность резьбы за счёт упрочнения металла и исключить потери материала. Литьё же в данном случае вводит лишний передел: получение заготовки → механическая обработка (обдирка, точение, накатывание резьбы), что увеличивает себестоимость и удлиняет технологическую цепочку.

Задание 2 (20 баллов)

Объясните, почему при сварке металлов электродуговым способом используется постоянный ток прямой полярности (минус на электроде, плюс на изделии), а не обратной? Какие физические процессы лежат в основе этого выбора?

Подробный разбор задания:

1. Краткий ответ (основной принцип)

При сварке постоянным током прямой полярности (электрод — катод, изделие — анод) основное тепловыделение сосредоточено на изделии, что обеспечивает глубокое проплавление основного металла при относительно низком нагреве электрода. Выбор полярности определяется требуемым соотношением между проплавлением основного металла и скоростью плавления электродного материала.

2. Физические процессы, лежащие в основе

В основе распределения тепла в сварочной дуге лежат различия в энергетических характеристиках катодной и анодной областей дуги.

2.1. Тепловыделение на электродах

В столбе дуги происходит ионизация газа и движение заряженных частиц:

Область	Процессы	Количество выделяемого тепла
Анод (положительный электрод)	Электроны, ускоренные в столбе дуги, бомбардируют анод, передавая ему свою кинетическую энергию. Также на аноде выделяется энергия, соответствующая работе выхода электронов.	Выделяется \approx 60–70% тепла всей дуги (при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов соотношение может варьироваться).
Катод (отрицательный электрод)	Эмиссия электронов требует затрат энергии (работа выхода). Кроме того, катод бомбардируется положительными ионами, но их масса велика, а подвижность мала, поэтому переносимая ими энергия меньше, чем энергия электронов на аноде.	Выделяется \approx 30–40% тепла дуги.

2.2. Распределение тепла при прямой и обратной полярности

Полярность	Схема	Распределение тепла	Эффект
Прямая	Электрод (-), изделие (+)	Большая часть тепла (\approx 60–70%) выделяется на изделии	Глубокое проплавление основного металла; электрод плавится медленнее, что снижает коэффициент наплавки.
Обратная	Электрод (+), изделие (-)	Большая часть тепла выделяется на электроде	Малые глубина проплавления и тепловложение в изделие; электрод

Полярность	Схема	Распределение тепла	Эффект
			плавится интенсивно (повышенный коэффициент наплавки).

3. Почему для большинства сварочных процессов выбирают прямую полярность

3.1. Обеспечение глубокого проплавления

При сварке конструкционных сталей и многих цветных металлов требуется проплавить основной металл на заданную глубину для формирования качественного корня шва и обеспечения прочности соединения. Прямая полярность обеспечивает максимальную концентрацию тепла в основном металле.

3.2. Стабильность дуги и качество формирования шва

При прямой полярности катодное пятно на электроде стабильнее (особенно при использовании вольфрамовых неплавящихся электродов в аргонодуговой сварке — TIG), что способствует устойчивому горению дуги и равномерному формированию шва.

3.3. Минимизация перегрева электрода (для неплавящихся электродов)

В аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом прямая полярность (DCEN — Direct Current Electrode Negative) является основной, так как:

- на катоде (электроде) выделяется меньше тепла, что предотвращает перегрев и оплавление вольфрама;
- обеспечивается максимальная глубина проплавления при минимальном износе электрода.

3.4. Удаление оксидной плёнки (особенность алюминия и магния)

Для сварки алюминия и магния, напротив, часто применяют обратную полярность (или переменный ток), поскольку при обратной полярности катодное распыление (катодная очистка) эффективно разрушает тугоплавкую оксидную плёнку на поверхности изделия. В этом случае физический принцип иной: тяжёлые положительные ионы Ar^+ бомбардируют поверхность изделия (катод), выбивая оксиды.

4. Исключения и нюансы

Ситуация	Выбор полярности	Причина
Сварка тонколистового металла	Обратная полярность (или переменный ток)	Снижение тепловложения в изделие для предотвращения прожогов.

Ситуация	Выбор полярности	Причина
Сварка алюминия и магния	Переменный ток (или обратная полярность)	Сочетание катодной очистки (на полупериоде обратной полярности) и глубокого проплавления (на полупериоде прямой).
Наплавка (увеличение слоя наплавленного металла)	Обратная полярность	Повышение коэффициента наплавки за счёт большего нагрева электрода.
Сварка покрытыми электродами (ММА)	Выбор зависит от типа электрода	Основные и рутиловые электроды для конструкционных сталей чаще работают на постоянном токе обратной полярности (электрод +), что обеспечивает стабильность горения дуги и формирование шва с минимальным разбрызгиванием. Это важное уточнение: в ручной дуговой сварке покрытым электродом обратная полярность применяется шире.

5. Обобщающий вывод

Выбор постоянного тока прямой полярности (минус на электроде, плюс на изделии) при сварке металлов обусловлен физическим распределением тепловой энергии в сварочной дуге, при котором до 70% тепла выделяется на аноде (изделии). Это обеспечивает:

- максимальную глубину проплавления;
- стабильность дуги;
- минимальный перегрев электрода (критически важно для вольфрамовых электродов в TIG-сварке).

Однако окончательный выбор полярности всегда определяется конкретным сварочным процессом, типом электрода, материалом заготовки и требуемыми характеристиками шва (глубина проплавления, доля наплавленного металла, необходимость катодной очистки).

Задание 3 (20 баллов)

Стальная деталь после закалки стала чрезмерно хрупкой. Какой технологический процесс необходимо применить для снижения хрупкости и

повышения пластичности, и каковы его основные параметры (температура, время выдержки, охлаждение)?

Подробный разбор задания:

1. Краткий ответ

Для снижения хрупкости и повышения пластичности закалённой стали необходимо провести отпуск (темперирование).

2. Сущность процесса отпуска

Закалка стали (нагрев выше критической температуры $A_{c3}A_{c3}$ или $A_{c1}A_{c1}$ с последующим быстрым охлаждением) приводит к образованию неравновесных структур — мартенсита и остаточного аустенита. Мартенсит представляет собой пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе с высокой плотностью дефектов кристаллической решётки, что обеспечивает высокую твёрдость и прочность, но крайне низкую пластичность и высокую хрупкость.

Отпуск — это термическая обработка, заключающаяся в нагреве закалённой стали до температуры ниже нижней критической точки $A_{c1}A_{c1}$ (обычно ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$), выдержке и последующем охлаждении. В процессе отпуска происходят следующие структурные превращения:

- распад мартенсита с выделением дисперсных карбидов;
- снижение концентрации углерода в α -твёрдом растворе;
- уменьшение внутренних напряжений;
- превращение остаточного аустенита (при определённых температурах);
- формирование более устойчивых и пластичных структур (отпущенный мартенсит, троостит, сорбит).

3. Основные параметры отпуска

3.1. Температура отпуска

Температура отпуска является главным параметром, определяющим конечные свойства стали. Выбор температуры зависит от требуемого сочетания прочности, пластичности и вязкости.

Вид отпуска	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Структура	Свойства
Низкий отпуск	150–250	Отпущенный мартенсит	Сохраняется высокая твёрдость (HRC 58–62), частично снимаются внутренние напряжения, хрупкость снижается незначительно. Применяется для режущего и измерительного инструмента, подшипников.

Вид отпуска	Температура, °С	Структура	Свойства
Средний отпуск	350–500	Троостит отпуска	Твёрдость HRC 40–50, повышенные упругость и предел выносливости. Применяется для рессор, пружин, штампов.
Высокий отпуск	500–680	Сорбит отпуска	Оптимальное сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости. Твёрдость HRC 25–35. Является заключительной операцией при улучшении (закалка + высокий отпуск) для конструкционных сталей, работающих под динамическими нагрузками.

Для снижения чрезмерной хрупкости после закалки обычно применяют высокий отпуск, если деталь является конструкционной, или средний, если требуются упругие свойства.

3.2. Время выдержки

Время выдержки при отпуске зависит от:

- толщины (сечения) детали — необходимо обеспечить равномерный прогрев по всему объёму;
- типа стали — для легированных сталей превращения протекают медленнее, требуя более длительной выдержки.

Ориентировочные значения:

- для деталей малого сечения (до 10 мм): 30–60 минут;
- для среднего сечения (10–50 мм): 60–120 минут;
- для крупных деталей: 2–4 часа и более (из расчёта 1 час на 25–50 мм толщины).

Выдержка отсчитывается с момента достижения заданной температуры по всему сечению детали (прогрева «насквозь»).

3.3. Охлаждение после отпуска

Охлаждение после отпуска обычно производится на воздухе (спокойно) для конструкционных и инструментальных сталей. Это обеспечивает постепенное снятие термических напряжений.

Нюансы:

- Для сталей, склонных к отпускной хрупкости (хромомарганцевые, хромоникелевые, некоторые легированные), после отпуска в интервале температур 450–600 °С применяют ускоренное охлаждение (в воде или масле) для предотвращения развития отпускной хрупкости II рода. В

этом случае после ускоренного охлаждения может проводиться дополнительный низкий отпуск для снятия напряжений, возникших при быстром охлаждении.

- Для сталей, не склонных к отпускной хрупкости, охлаждение на воздухе является стандартным.

4. Исключительные случаи и альтернативы

Ситуация	Рекомендуемый процесс	Обоснование
Деталь изготовлена из быстрорежущей стали (Р6М5 и др.)	Многократный отпуск (2–3 цикла) при 540–570 °С	Вторичное твердение за счёт выделения карбидов; превращение остаточного аустенита.
Деталь из низкоуглеродистой цементируемой стали после закалки	Низкий отпуск при 150–200 °С	Поверхностный слой после цементации требует высокой твёрдости, хрупкость сердцевины не является критической.
Требуется полное устранение хрупкости при сохранении высокой твёрдости	Изотермическая закалка (как альтернатива обычной закалке + отпуску)	Получение бейнитной структуры, обладающей более высокими пластичностью и вязкостью по сравнению с мартенситом при одинаковой твёрдости.
Деталь из высокоуглеродистой стали (У8, У10)	Низкий отпуск (160–200 °С)	Для инструментальных сталей высокий отпуск недопустим из-за резкого снижения твёрдости.

5. Обобщающий вывод

Для устранения чрезмерной хрупкости закалённой стали необходимо провести **отпуск** — нагрев до температуры ниже $A_{c1}A_{c1}$, выдержку и охлаждение. Основные параметры:

Параметр	Значение
Температура	От 150 до 680 °С (выбирается исходя из требуемых свойств; для устранения хрупкости конструкционных сталей — 500–680 °С)
Время выдержки	От 30 минут до нескольких часов (зависит от сечения детали и легированности стали)
Охлаждение	На воздухе (для большинства сталей); ускоренное (в воде или масле) — для сталей, склонных к отпускной хрупкости II рода, с последующим низким отпуском при необходимости

Правильно выбранный режим отпуска обеспечивает снижение внутренних напряжений, преобразование мартенсита в стабильные структуры и достижение оптимального сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости, требуемого для эксплуатации детали.

Задание 4 (20 баллов)

Для ответственной детали из стали 40ХН (поршневой палец) требуется получить высокую поверхностную твёрдость (HRC 58-62) для износостойкости и вязкую сердцевину для сопротивления ударным нагрузкам. Разработайте комбинированную технологию упрочняющей обработки, включающую два последовательных процесса химико-термической и термической обработки. Обоснуйте выбор каждого процесса, укажите примерные параметры (температура, среда, время) и получаемую структуру в поверхностном слое и сердцевине.

Подробный разбор задания:

1. Выбранная комбинированная технология

Цементация (химико-термическая обработка) + закалка с низким отпуском (термическая обработка)

2. Обоснование выбора процессов

2.1. Сталь 40ХН

Сталь 40ХН (0,36–0,44% С, 0,7–1,0% Cr, 1,2–1,6% Ni) относится к конструкционным хромоникелевым сталям, применяемым для ответственных деталей, работающих при высоких циклических и ударных нагрузках. Наличие никеля обеспечивает высокую вязкость сердцевины после термической обработки, хром — прокаливаемость и износостойкость. Среднее содержание углерода (около 0,4%) не позволяет получить после закалки поверхностную твёрдость HRC 58–62 без дополнительного науглероживания, так как собственная твёрдость закалённой стали 40ХН составляет HRC 50–55. Для достижения требуемой поверхностной твёрдости необходимо искусственное повышение содержания углерода в поверхностном слое.

2.2. Выбор цементации как метода химико-термической обработки

Цементация (науглероживание) позволяет:

- создать в поверхностном слое (глубиной 0,8–1,5 мм) содержание углерода 0,8–1,0%;
- после последующей закалки получить в этом слое высокую твёрдость (HRC 58–62) за счёт образования мартенсита;
- сохранить в сердцевине исходный химический состав и, после правильной термической обработки, получить вязкую структуру, устойчивую к ударным нагрузкам.

Альтернативные методы (азотирование, цианирование) не позволяют получить сочетание глубокого упрочнённого слоя и высокой вязкости сердцевины в данной стали для условий работы поршневого пальца (циклические знакопеременные и ударные нагрузки).

2.3. Выбор термической обработки после цементации

После цементации необходима закалка + низкий отпуск, которые выполняют две функции:

- закалка — формирует мартенситную структуру в науглероженном слое (высокая твёрдость) и в сердцевине (с учётом легирования обеспечивает прокаливаемость и последующую вязкость);
- низкий отпуск — снимает закалочные напряжения, несколько снижает хрупкость, сохраняя твёрдость на требуемом уровне (HRC 58–62 для поверхностного слоя).

3. Параметры обработки

3.1. Цементация (химико-термическая обработка)

Параметр	Значение	Обоснование
Способ	Твердая (насыпная) цементация или газовый способ в эндотермической атмосфере с добавлением природного газа	Газовый способ обеспечивает более равномерный слой и лучший контроль процесса; твердая цементация применяется в мелкосерийном производстве.
Температура	920–950 °С	Оптимальный интервал для насыщения аустенита углеродом при сохранении мелкого зерна в стали 40ХН.

Параметр	Значение	Обоснование
Среда (при газовой цементации)	Эндотермическая атмосфера + обогащающий газ (метан, пропан)	Обеспечивает углеродный потенциал $C_p \approx 0,9-1,1\%$ $C_p \approx 0,9-1,1\%$.
Время выдержки	4–8 часов (в зависимости от требуемой глубины слоя)	Для глубины слоя 1,0–1,5 мм ориентировочно 6 часов. Скорость науглероживания: $\approx 0,15-0,2$ мм/час.
Глубина цементованного слоя	1,0–1,5 мм	Обеспечивает необходимый запас на последующую шлифовку и достаточную износостойкость.

3.2. Термическая обработка после цементации

Параметр	Значение	Обоснование
Первая операция (опционально)	Нормализация (850–870 °С) или высокий отпуск (640–660 °С) после цементации	Исправление структуры после длительного нагрева (устранение крупнозернистости в сердцевине). Для стали 40ХН часто допустима непосредственная закалка с температуры цементации (прямая закалка) с последующим высоким отпуском перед окончательной закалкой.
Закалка	Нагрев 820–850 °С	Температура выше A_{c3} для стали 40ХН (с учётом легирования). Обеспечивает полную аустенизацию сердцевины и науглероженного слоя.

Параметр	Значение	Обоснование
Охлаждение при закалке	Масло (или полимерная среда)	Масло обеспечивает критическую скорость закалки для получения мартенсита без риска образования трещин. Сталь 40ХН обладает высокой прокаливаемостью, вода может вызвать деформации и трещины.
Низкий отпуск	160–200 °С	Превращение мартенсита в отпущенный мартенсит; снятие внутренних напряжений. Твёрдость после отпуска: поверхность — HRC 58–62, сердцевина — HRC 35–45 (в зависимости от сечения).
Время выдержки при отпуске	1,5–2,5 часа (зависит от сечения детали)	Обеспечивает равномерный прогрев по сечению.
Охлаждение после отпуска	На воздухе	Сталь 40ХН не склонна к отпускной хрупкости II рода в данном интервале температур.

4. Получаемая структура и свойства

Зона	После цементации + закалки + низкого отпуска	Твёрдость	Свойства
Поверхностный слой	Отпущенный мартенсит + избыточные карбиды	HRC 58–62	Высокая износостойкость, сопротивление контактным напряжениям, твёрдость.

Зона	После цементации + закалки + низкого отпуска	Твёрдость	Свойства
Сердцевина	Структура закалённой и отпущенной стали 40ХН: отпущенный мартенсит (или бейнит) с равномерным распределением легирующих элементов	HRC 35–45 (в зависимости от сечения)	Высокая ударная вязкость, пластичность, сопротивление циклическим нагрузкам.

Для поршневого пальца такое сочетание обеспечивает:

- износостойкость наружной поверхности, работающей в паре с бронзовой втулкой (или игольчатым подшипником);
- сопротивление ударным нагрузкам за счёт вязкой сердцевины;
- высокий предел выносливости благодаря благоприятному распределению остаточных напряжений (сжимающие напряжения в поверхностном слое).

5. Альтернативные подходы и их недостатки для данной задачи

Вариант	Недостатки для поршневого пальца из стали 40ХН
Азотирование	Тонкий упрочнённый слой (0,3–0,5 мм); недостаточная износостойкость при высоких контактных нагрузках; сложность получения твёрдости HRC 58–62 при сохранении вязкой сердцевины без предварительной закалки.
Закалка ТВЧ	Позволяет получить высокую твёрдость поверхности без изменения химического состава, но для стали 40ХН собственная твёрдость после закалки ТВЧ без науглероживания не превышает HRC 55–57, что ниже требуемой.
Цианирование	Тонкий слой; экологические ограничения; менее стабильные результаты для ответственных деталей.

Вариант	Недостатки для поршневого пальца из стали 40ХН
Цементация + закалка в воде	Высокий риск трещинообразования из-за высоких закалочных напряжений.

Задание 5 (20 баллов)

Для лопатки газотурбинного двигателя низкого давления требуется материал, работающий при температурах до 600°C в условиях центробежных нагрузок, вибрации и окислительной среды. Сравните два кандидата: 1) Деформируемый жаропрочный никелевый сплав; 2) Керамический композит на основе оксида алюминия (Al_2O_3). Проведите сравнительный анализ по следующим критериям: а) удельная жаропрочность (отношение предела ползучести к плотности), б) технологичность изготовления детали сложной аэродинамической формы, в) стойкость к термоудару. Какой материал вы выберете и почему? Ответ обоснуйте.

Подробный разбор задания:

1. Сравнительный анализ по трём критериям

а) Удельная жаропрочность (отношение предела ползучести к плотности)

Материал	Плотность, г/см ³	Предел ползучести при 600°C (условно)	Удельная жаропрочность	Обоснование
Никелевый деформируемый сплав (например, ЭИ437Б, Inconel 718)	8,2–8,5	Высокий (400–600 МПа при 600°C для 100 ч)	Высокая	Жаропрочные никелевые сплавы сохраняют высокую длительную прочность и сопротивление ползучести до 700–750°C благодаря γ' -фазе (Ni_3Al) и сложному легированию.

Материал	Плотность, г/см ³	Предел ползучести при 600°С (условно)	Удельная жаропрочность	Обоснование
				Удельная прочность на уровне 50–70 МПа/(г/см ³).
Керамический композит Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ (оксидная керамика с волокнистым армированием)	3,8–4,2	Умеренный (керамика хрупка, предел ползучести не является стандартной характеристикой; при 600°С керамика сохраняет прочность, но чувствительна к дефектам)	Условно высокая, но с оговорками	Керамика имеет низкую плотность, однако классическая монолитная керамика не обладает пластичностью и сопротивлением ползучести в привычном понимании. Волокнистые композиты (оксид–оксид) демонстрируют псевдопластичность, но при 600°С их прочность всё же уступает металлическим сплавам при циклических и длительных нагрузках. Удельная

Материал	Плотность, г/см ³	Предел ползучести при 600°C (условно)	Удельная жаропрочность	Обоснование
				прочность по разрушению может быть выше, но по сопротивлению ползучести — ниже.

Вывод по критерию: Никелевый сплав превосходит керамический композит по надёжности сопротивления ползучести при длительном нагружении (ползучесть — критический механизм разрушения лопаток).

б) Технологичность изготовления детали сложной аэродинамической формы

Материал	Технологичность	Обоснование
Никелевый деформируемый сплав	Высокая	Лопатки изготавливаются методом точного литья по выплавляемым моделям (инвестиционное литьё) с последующей механической обработкой (профилирование, полировка). Технология отработана десятилетиями, обеспечивает высокую повторяемость сложных профилей (пера лопатки, замковой части). Возможна также штамповка с последующей доводкой.
Керамический композит Al ₂ O ₃	Низкая	Изготовление сложных аэродинамических форм (тонкие входные и выходные кромки, переменный профиль) из оксидной керамики или керамического композита крайне сложно.

Материал	Технологичность	Обоснование
		Требуются специальные методы: шликерное литьё, прессование с последующим спеканием, химическое осаждение из газовой фазы (CVI) для волокнистых композитов. Обеспечение точности геометрии и повторяемости свойств в серийном производстве значительно сложнее и дороже, чем для металлов. Высокая хрупкость затрудняет механическую доработку.

Вывод по критерию: Никелевый сплав имеет неоспоримое преимущество по технологичности изготовления лопаток сложной формы с требуемой точностью.

в) Стойкость к термоудару

Материал	Стойкость к термоудару	Обоснование
Никелевый деформируемый сплав	Высокая	Металлы обладают высокой теплопроводностью (10–15 Вт/(м·К) для никелевых сплавов при 600°C) и пластичностью. При резких изменениях температуры (запуск, останов двигателя, попадание струи дождя) возникающие термические напряжения релаксируют за счёт пластической деформации. Трещиностойкость высока.
Керамический композит Al ₂ O ₃	Низкая	Оксидная керамика имеет низкую теплопроводность (5–10 Вт/(м·К)), высокий модуль упругости и практически нулевую пластичность. При термоударе возникают значительные градиенты температуры и, как следствие, высокие

Материал	Стойкость к термоудару	Обоснование
		термические напряжения, которые не релаксируют. Даже армированные волокном оксидные композиты имеют ограниченную термоциклическую стойкость, особенно в условиях реальной эксплуатации ГТД с быстрыми изменениями режимов.

Вывод по критерию: Никелевый сплав значительно превосходит керамический композит по стойкости к термоудару, что критически важно для лопаток, работающих в нестационарных режимах двигателя. 2. Рекомендация и обоснование выбора

Рекомендуемый материал: деформируемый жаропрочный никелевый сплав (например, ЭИ437Б (ХН77ТЮР), Inconel 718, Nimonic 80А).

2. Обоснование выбора с учётом условий эксплуатации лопатки ГТД низкого давления:

1. Длительная прочность и ползучесть. Лопатки ГТД работают под действием центробежных сил в течение тысяч часов. Никелевые сплавы обладают проверенной способностью сопротивляться ползучести в интервале температур до 600–700°C благодаря упрочнению интерметаллидной фазой γ' . Керамические композиты имеют принципиально иной механизм разрушения (хрупкое, чувствительное к дефектам), и их длительная прочность при циклическом нагружении и ползучести при 600°C изучена недостаточно и уступает металлическим сплавам по надёжности.

2. Стойкость к вибрационным нагрузкам. Лопатки подвержены высокочастотным вибрациям (резонансные колебания). Никелевые сплавы обладают высокой усталостной прочностью, вязкостью разрушения и способностью к демпфированию. Керамические композиты, даже армированные, склонны к накоплению микрповреждений при циклическом нагружении, что может привести к внезапному хрупкому разрушению, недопустимому для авиационного двигателя.

3. Окислительная среда. При 600°C никелевые сплавы образуют защитную оксидную плёнку (Cr_2O_3 , NiO), обеспечивающую достаточную жаростойкость. При необходимости на лопатки наносятся дополнительные защитные покрытия. Керамика Al_2O_3 химически стойка к окислению, однако её недостаток — чувствительность к термическим напряжениям и низкая стойкость к термоудару в реальных условиях.

4. Надёжность и ремонтпригодность. Металлические лопатки допускают неразрушающий контроль (ультразвуковой, рентгеновский, вихретоковый), выявление дефектов и, в определённых пределах, ремонт (заварка трещин, восстановление геометрии). Керамические композиты имеют ограниченные возможности контроля и практически не ремонтируются, что снижает ресурс и увеличивает стоимость эксплуатации.

5. Температурный диапазон. Для температур до 600°C никелевые сплавы находятся в зоне уверенной работоспособности. Керамические композиты целесообразно применять при более высоких температурах (900–1200°C), где металлические сплавы уже теряют

прочность. При 600°C преимущества керамики (низкая плотность, жаростойкость) не перевешивают её недостатков (хрупкость, сложность изготовления, низкая стойкость к термоудару и вибрациям).

3. Заключение

Критерий	Никелевый сплав	Керамический композит Al ₂ O ₃	Предпочтение
Удельная жаропрочность	Высокая (проверенная)	Ограниченная (риск хрупкого разрушения)	Никелевый сплав
Технологичность сложных форм	Высокая (инвестиционное литьё)	Низкая	Никелевый сплав
Стойкость к термоудару	Высокая	Низкая	Никелевый сплав

Итоговая рекомендация: деформируемый жаропрочный никелевый сплав.

Для лопатки ГТД низкого давления с рабочей температурой до 600°C никелевый сплав обеспечивает необходимое сочетание жаропрочности, усталостной прочности, стойкости к термоудару, технологичности и эксплуатационной надёжности. Керамические композиты на основе Al₂O₃, несмотря на меньшую плотность, не могут конкурировать по совокупности свойств в данном диапазоне температур и условиях нагружения, уступая прежде всего по стойкости к термоудару, вибрационным нагрузкам и технологичности изготовления сложных аэродинамических профилей. Их применение перспективно при более высоких температурах (лопатки турбины высокого давления), где металлические сплавы уже исчерпывают свои возможности.