

Литейное производство

УДК 621.74.045 + 669.295 : 621.74.045

ВЫБОР СВЯЗУЮЩИХ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

И.Р. Мухаммадеев, О.Б. Деменок, А.А. Ганеев, С.П. Павлинч, П.В. Аликин
Уфимский государственный авиационный технический университет, г.Уфа

Проведены исследования влияния различных связующих на водной основе: ЕНТ Binder (США), Remasol (Великобритания), Армосил разных модификаций (Россия, г. Казань) на физико-механические свойства оболочковых форм и глубину альфированного слоя. Определены наиболее перспективные связующие для литья титановых сплавов. Получены данные о взаимодействии порошка АСД-4 с водными связующими и даны рекомендации его процентного соотношения для получения оптимальных свойств.

Все керамические суспензии готовились по единой технологии. В смеситель вводили связующее и наполнитель, перемешивали до получения гомогенной массы, доводя до нужной вязкости, и затем на модельном блоке формировали покрытие методом послойного нанесения. Обсыпку блоков осуществляли по существующей в серийном производстве технологии.

С целью повышения прочностных характеристик оболочковых форм в суспензию был введен мелкодисперсный порошок алюминия АСД-4 в количестве 5 и 7,5 % от массы наполнителя.

Для определения альфированного слоя был использован микроструктурный анализ. Для определения толщины альфированного слоя были изготовлены микрошлифы из образцов с выходом на исследуемые поверхности. Вырезка заготовок для макро- и микрошлифов производилась с помощью абразивных кругов с охлаждающей средой.

На основании проведенных исследований разработана технологическая инструкция по изготовлению оболочковых форм на основе связующих Remasol, Remasol с добавкой 5 % АСД-4, Армосил АМ и Армосил АМ с добавкой 5 % АСД-4.

Ключевые слова: оболочковая форма; связующие на водной основе; альфированный слой; огнеупорная суспензия; титановый сплав; крупногабаритные отливки.

В авиастроении при изготовлении отливок широкое распространение получили электрокорундовые формы, получаемые по выплавляемым моделям на этилсиликатном связующем.

Однако при использовании данной технологии на поверхности титановых отливок образуется насыщенный примесями и отрицательно влияющий на характеристики изделия, поверхностный слой (альфированный слой). Также существенным недостатком данных связующих является дороговизна, неэкологичность и низкая живучесть, что ограничивает их применение для крупногабаритных отливок из титановых сплавов.

С целью возможности замены этилсиликатных связующих были проведены исследования влияния различных связующих на водной основе: ЕНТ Binder (США), Remasol (Великобритания), Армосил разных модификаций (Россия, г. Казань) на физико-механические свойства оболочковых форм и глубину альфированного слоя.

Определение предела прочности и прогиба при изгибе керамической оболочковой формы проводилось на образцах в виде керамических пластин размерами 80×20×(6–7) мм. Образцы керамической формы на водных связующих пред-

ставлены на рис. 1. Для изготовления керамических пластин использовались восковые модели «лодочка» из модельной массы ПС 50-50 (рис. 2).

Для получения образцов оболочковой формы модели «лодочка» облицовывались по технологии литья по выплавляемым моделям.

Все керамические суспензии готовились по единой технологии. В смеситель вводили связующее и наполнитель, перемешивали до получения гомогенной массы, доводя до нужной вязкости и затем на модельном блоке формировали покрытие методом послойного нанесения. Обсыпку блоков осуществляли по существующей в серийном производстве технологии.

Модельную массу из полученной керамической формы удаляли в горячей воде при температуре 96–98 °С или в пароавтоклаве при температуре 140–150 °С.

Составы и технологические параметры изготовления оболочковых форм на водных связующих: ЕНТ, Remasol Premium Plus, Remasol Premium, Армосил А, Армосил АМ и Армосил Х представлены в табл. 1. Образцы прокаливались при температурах 1000 и 1200 °С в печи Nabertherm.



а)



б)

Рис. 1. Образцы керамической формы на водных связующих для испытаний на изгиб без упрочняющего компонента (а) и с упрочняющим компонентом (б)



Рис. 2. Восковая модель «лодочка»

Таблица 1

Сводная таблица технологий изготовления оболочковых форм на основе водных связующих

№ п/п	Характеристика суспензии			Обсыпочный материал	Вариант и режим сушки	Режим прокалики керамических оболочек
	Компоненты		Условная вязкость по ВЗ-4, с			
	Связующее	Наполнитель				
1	ЕНТ	Микropoшok электрокорунда F1200	1 и 2 слои: 70...75; послед. слои: 28...33; закрепление: 8...33	1 и 2 слои: электрокорунд № 20; 3 и послед. слои: электрокорунд № 50	Для 1 и 2 слоев: выдержка на воздухе не менее 90 мин; для 3 и послед. слоев: выдержка 60 мин на воздухе	T = 1000 °C, t = 6 ч; T = 1200 °C, t = 6 ч
		Микropoшok электрокорунда F1200 + АСД				
2	Remasol Premium Plus	Микropoшok электрокорунда F1200	1 и 2 слои: 65...70	1 и 2 слои: электрокорунд № 20	Для 1 и 2 слоев: выдержка на воздухе не менее 4 ч	T = 1000 °C, t = 6 ч; T = 1200 °C, t = 6 ч
		Микropoшok электрокорунда F1200 + АСД				
3	Армосил А	Микropoшok электрокорунда F1200	Послед. слои: 30...35; закрепление: 30...35	3 и послед. слои: электрокорунд № 50	Для 3 и послед. слоев: выдержка 2 ч на воздухе	T = 1000 °C, t = 6 ч; T = 1200 °C, t = 6 ч
		Микropoшok электрокорунда F1200 + АСД				
4	Армосил АМ(м)	Микropoшok электрокорунда F1200	1 и 2 слои: 50...60; послед. слои: 27...32; закрепление: 27...32	1 и 2 слои: электрокорунд № 20; 3 и послед. слои: электрокорунд № 50	Для 1 и 2 слоев: выдержка на воздухе не менее 90 мин; для 3 и послед. слоев: выдержка 60 мин на воздухе	T = 1000 °C, t = 6 ч; T = 1200 °C, t = 6 ч
		Микropoшok электрокорунда F1200 + АСД				
5	Армосил X	Микropoшok электрокорунда F1200	1 и 2 слои: 50...60; послед. слои: 27...32; закрепление: 27...32	1 и 2 слои: электрокорунд № 20; 3 и послед. слои: электрокорунд № 50	Для 1 и 2 слоев: выдержка на воздухе не менее 90 мин; для 3 и послед. слоев: выдержка 60 мин на воздухе	T = 1000 °C, t = 6 ч; T = 1200 °C, t = 6 ч

Испытания проводились на установке при температурах 20; 400; 800; 1100 °С.

Прокаленный образец помещался в печь установки, в которой заранее устанавливали требуемую температуру и выдерживали 30 мин для выравнивания температуры по его сечению. Скорость нагружения образца задавали равной 2,5 Н/с. Предел прочности при изгибе определяли по формуле (1). Приводимые значения предела прочности и прогиба при изгибе являются среднеарифметическими результатами испытания 5–10 образцов. Разброс данных отдельных испытаний не превышал 5–10 %.

Размер образцов измеряли с помощью микрометра с погрешностью, не превышающей 0,01 мм.

Предел прочности образцов оболочковых форм оценивали испытанием образцов при статическом изгибе. Образцы нагружали по схеме трехточечного изгиба (рис. 3) [1].

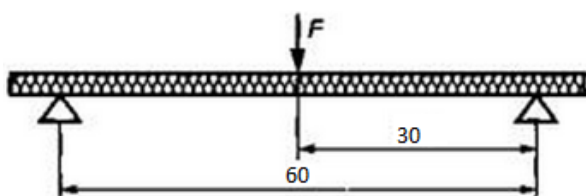


Рис. 3. Схема испытания образца при изгибе

Метод испытания заключается в приложении перпендикулярно к поверхности прямоугольного образца, расположенного на двух опорах, нагружающего усилия.

Предел прочности рассчитывали по формуле

$$\sigma_{и} = \frac{M}{W_x}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где M – изгибающий момент, кНм; W_x – осевой момент сопротивления сечения, м³.

Изгибающий момент рассчитывали по формуле

$$M = \frac{FL}{4}, \text{ кНм}, \quad (2)$$

где F – прилагаемое изгибающее усилие, кН; L – расстояние между внешними опорами, равно 0,06 м.

Осевой момент сопротивления относительно горизонтальной оси для сечения прямоугольной формы рассчитывали по формуле

$$W_x = \frac{bh^2}{6}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где b – ширина сечения, м; h – толщина сечения, м.

По этим экспериментальным данным построены графики зависимости предела прочности при изгибе керамических форм от температур испытания и прокалики на основе различных связующих (рис. 4–9).

Из рис. 4 следует, что при температуре прокалики 1000 °С предел прочности при изгибе оболочковых форм на основе связующих Remasol и ЕНТ в пределах температуры испытаний повышается с 15 до 30 МПа, а на основе Армосил А, Армосил АМ и Армосил для Тi практически не меняется. Некоторые колебания находятся в пределах ошибки измерений.

Из анализа графика испытаний образцов (рис. 5), прокаленных при температуре 1200 °С следует, что повышение температуры прокалики до 1200 °С способствует упрочнению оболочковых форм и температура испытаний почти не оказывает влияния на их прочность. Предел прочности при изгибе оболочковых форм на основе ЕНТ и Remasol при нагреве в интервале температур испытаний значительно повышается, на основе Армосил для Тi остается практически неизменным, а на основе Армосил А и Армосил АМ даже снижается.

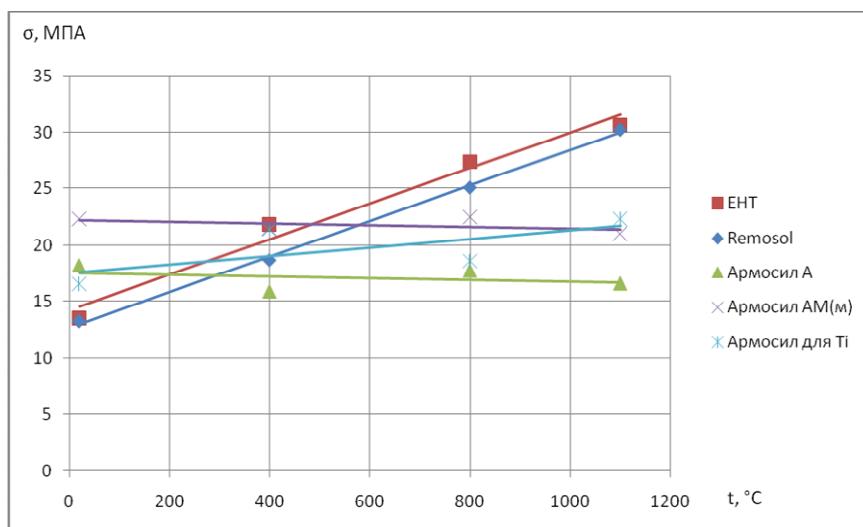


Рис. 4. Графики зависимостей предела прочности при изгибе образцов форм от температуры испытания (температура прокалики формы 1000 °С)

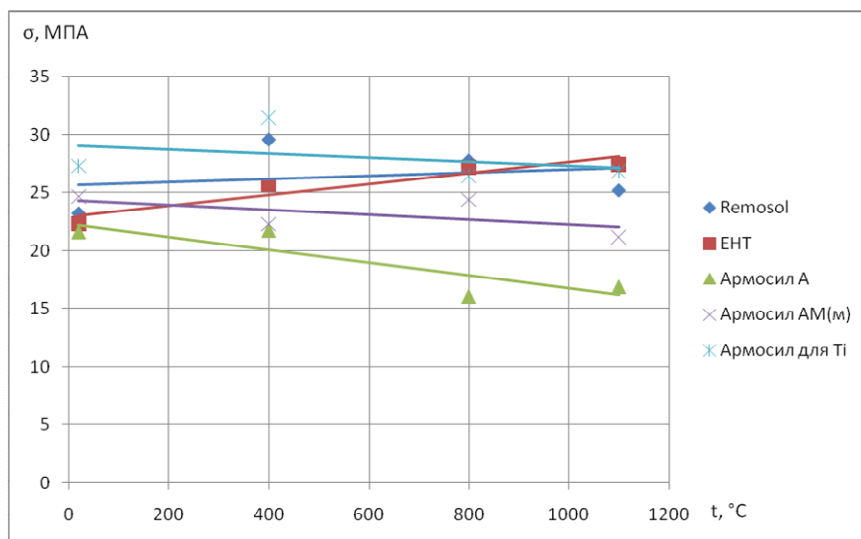


Рис. 5. Графики зависимостей предела прочности при изгибе образцов форм от температуры испытания (температура прокалики формы 1200 °C)

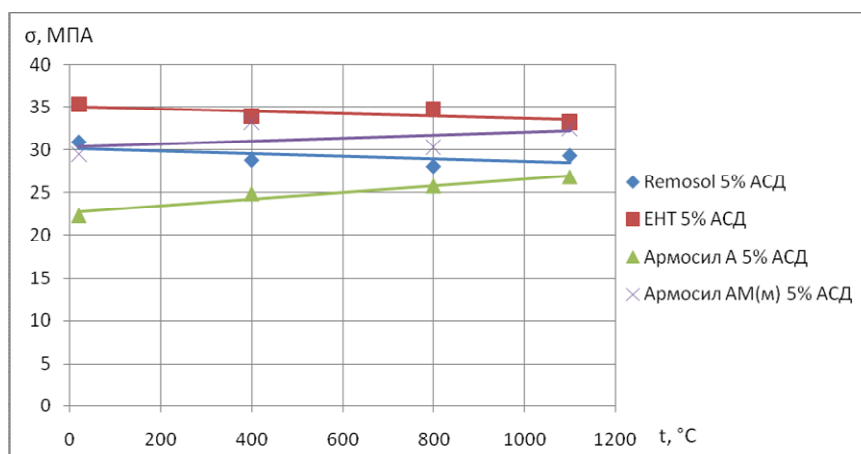


Рис. 6. Графики зависимостей предела прочности при изгибе образцов форм с добавлением 5% АСД от температуры испытания (температура прокалики формы 1000 °C)

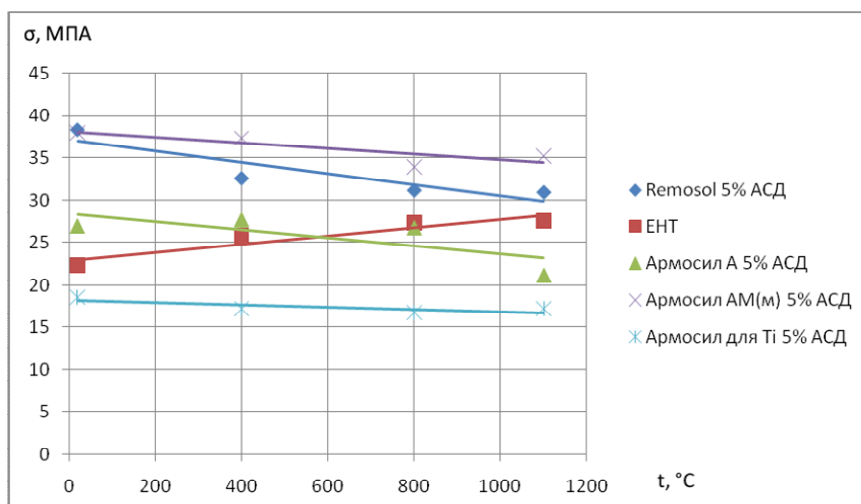


Рис. 7. Графики зависимостей предела прочности при изгибе образцов форм с добавлением 5% АСД от температуры испытания (температура прокалики формы 1200 °C)

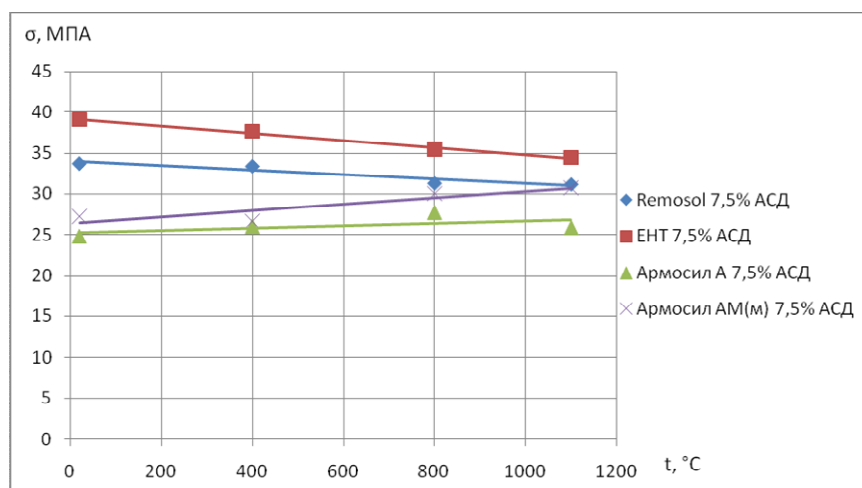


Рис. 8. Графики зависимостей предела прочности при изгибе образцов форм с добавлением 7,5 % АСД от температуры испытания (температура прокаливания формы 1000 °C)

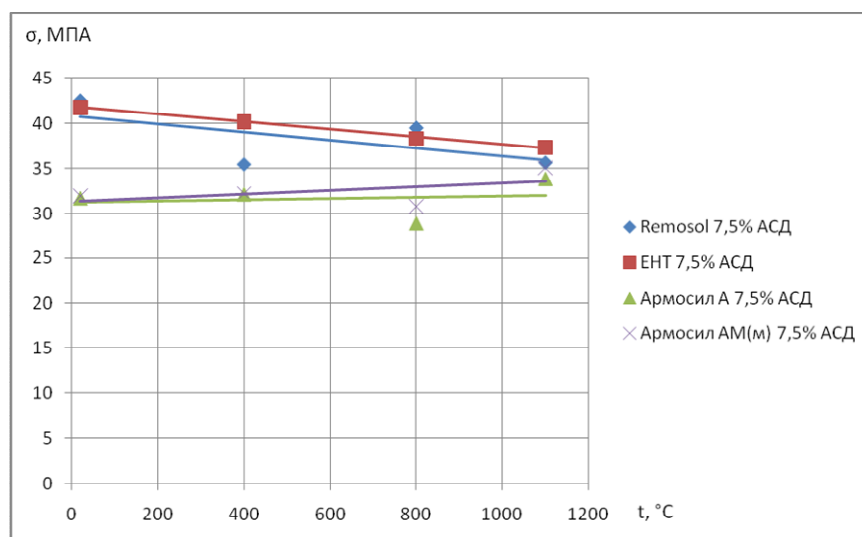


Рис. 9. Графики зависимостей предела прочности при изгибе образцов форм с добавлением 7,5 % АСД от температуры испытания (температура прокаливания формы 1200 °C)

Из анализа графиков 4 и 5 следует, что условию необходимой прочности оболочковых форм (выше 25 МПа) отвечают связующие на водной основе ЕНТ и Армосил для Ti. Однако запас прочности у данных форм составляет всего 5,6 %, что недостаточно для литья титановых сплавов центробежным способом.

С целью повышения прочностных характеристик оболочковых форм в суспензию был введен мелкодисперсный порошок алюминия АСД-4 (ТУ 1791-007-49421776-2011) в количестве 5 и 7,5 % от массы наполнителя.

Графики зависимости предела прочности при изгибе образцов керамических форм с добавлением 5 и 7,5 % АСД приведены на рис. 6–7.

Добавление АСД в количестве 5 % привело к следующим результатам:

1) увеличение прокаливания с 1000 до 1200 °C (так же как и в связующих без упрочняющего наполнителя) приводит к увеличению прочности оболочковых форм у всех исследованных связующих на водной основе;

2) во всех связующих, кроме «Армосил для Ti», наблюдается значительное увеличение прочности (в ряде случаев до 70 % от первоначальной);

3) формы на связующем «Армосил для Ti» разупрочняются, также значительно уменьшается время жизни суспензии и на третьи сутки после добавления АСД она непригодна для дальнейшего использования;

4) оба зарубежных связующих показали высокие результаты (запас прочности превышает 20 %);

5) из отечественных аналогов сопоставимые результаты показал «Армосил АМ».

Литейное производство

Поскольку добавление 5 % АСД в суспензию «Армосил для титановых сплавов» привело к ухудшению её характеристик, то дальнейшие исследования проводились только на 4 видах связующих.

Таким образом, на основе проведенных исследований влияния различных связующих на водной основе с добавкой и без добавки АСД-4, температур прокаливания форм и испытаний их свойств, было установлено:

1) увеличение температуры прокаливания с 1000 до 1200 °С приводит к увеличению прочности оболочковых форм у всех исследованных связующих на водной основе;

2) все исследованные связующие с добавлением 7,5 % АСД при температуре прокаливания 1200 °С имеют прочностные характеристики, превышающие 25 МПа;

3) добавление 7,5 % АСД в российские кремнезоли привело к значительному увеличению времени сушки (более чем в 3 раза) оболочковых форм.

4) прокаливание оболочковых форм на основе водных связующих необходимо проводить при температуре ≥ 1200 °С;

5) в качестве связующих для изготовления керамической оболочковой формы для литья крупногабаритных отливок по прочностным характеристикам можно рекомендовать следующие связующие:

– Remasol с добавлением 5 % АСД-4 от массы суспензии ($\sigma_{20} = 38,35$ МПа) и Remasol с добавлением 7,5 % АСД-4 от массы суспензии ($\sigma_{20} = 42,47$ МПа);

– ЕНТ с добавлением 5 % АСД-4 ($\sigma_{20} = 39,61$ МПа) и ЕНТ с добавлением 7,5 % АСД-4 ($\sigma_{20} = 41,83$ МПа);

– Армосил АМ с добавлением АСД-4 в количестве 5 % от массы суспензии ($\sigma_{20} = 37,99$ МПа).

Для исследования альфированного слоя была реализована следующая методика: на литниково-питающую систему (ЛПС) модельных блоков, отливаемых в цехе титанового литья (ОАО УМПО), приклеивались образцы оболочковых форм на основе исследуемых водных связующих (рис. 10). Далее блок облицовывался по серийной технологии. Таким образом, при заливке жидкий металл контактировал в идентичных условиях с оболочковой формой и различными связующими, что позволяло сравнить альфированный слой при контакте жидкого металла с формой на основе различных видов кремнезелей и гидролизованного этилсиликата.

Для определения альфированного слоя был использован микроструктурный анализ [2]. Для определения толщины альфированного слоя были изготовлены микрошлифы из образцов с выходом на исследуемые поверхности. Вырезка заготовок для макро- и микрошлифов производилась с помощью абразивных кругов с охлаждающей средой. Образцы отливки для исследования на наличие альфированного слоя приведены на рис. 11. При этом вблизи места реза образуется зона с измененной микроструктурой, не менее 2 мм. Для удаления этого слоя применялась механическая обработка поверхности будущего шлифа.

Механическая обработка заготовок после вырезки при подготовке шлифов производилась резцами из твердосплавных материалов типа ВК.

Шлифование образцов производилось на станке с помощью шкурки различной зернистости с постепенно уменьшающейся степенью зернистости абразивного материала. Абразивные материалы, применяемые при шлифовании, приведены в табл. 2.

Окончательным этапом изготовления микрошлифов является полирование, которое производилось на вращающемся круге вначале на грубом сукне, а затем на тонком сукне.



Рис. 10. Модельный блок с образцами керамической формы на основе кремнезелей



Рис. 11. Образцы отливки для исследования на наличие альфированного слоя

Таблица 2

Абразивные материалы, применяемые при шлифовании титановых сплавов

Шкурки марки КЗ		Шкурки марки КЗМ	
Номер абразива	Размер зерна, мм	Номер абразива	Размер зерна, мкм
12	150–125	М-40	40–28
10	125–105	М-28	28–23
8	105–75	М-23	23–20
6	84–63	М-20	20–14
5	63–42	М-14	14–10
4	53–28	М-10	10–7
3	42–20		

В качестве абразивного материала применялась водная суспензия окиси хрома с размером частиц 0,1–0,3 мкм.

Более тонкое полирование шлифа осуществлялось с помощью электролитической полировки. Для полировки использовали электролит следующего состава (в мл):

- хлорная кислота (HClO_4) – 93;
- уксусный ангидрид – 398.

Условия полировки:

- напряжение 30–40 В;
- ток 0,5–1,5 А;
- температура электролита 20–25 °С;
- катод – титан.

В качестве пинцета для крепления шлифа, использовали нержавеющую сталь. Время полировки

подбиралось опытным путем. Полирование проводилось в стеклянной ванне с прерыванием для предотвращения разогрева электролита.

Для выявления макро- и микроструктуры использовали травитель (в % по объему):

- 1 часть плавиковой кислоты;
- 1 часть азотной кислоты;
- 3 части дистиллированной воды.

Время травления подбирали опытным путем. После травления шлифы промывали водой и сушили сжатым воздухом.

Микроструктуру образцов исследовали на инвертированном оптическом микроскопе Olympus GX51.

Микроструктура материала образцов представлена на рис. 12–18. Результаты измерений величины альфированного слоя сведены в табл. 3.

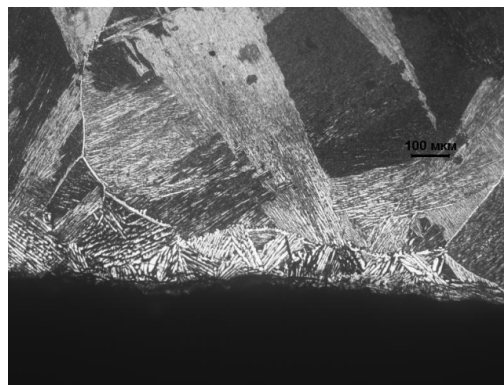
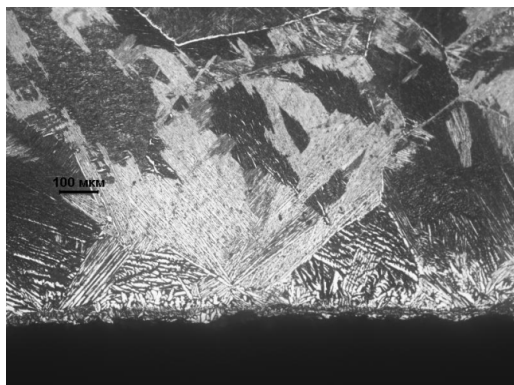


Рис. 12. Микроструктура поверхности контакта сплава с формой (связующее этилсиликат)

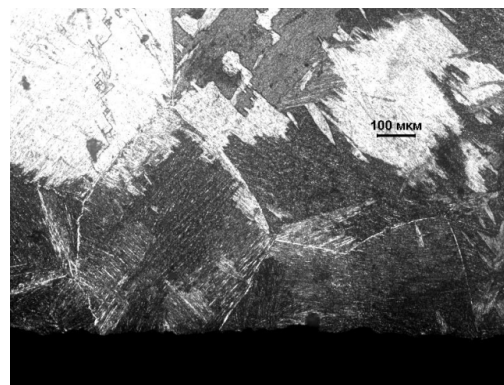
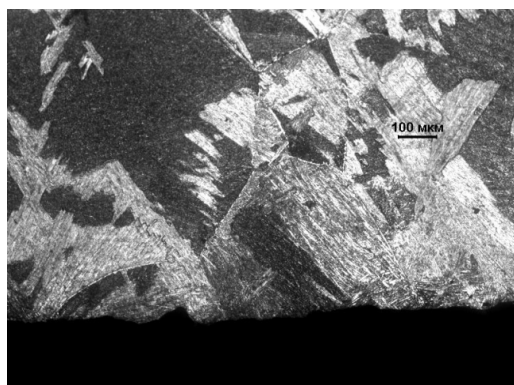


Рис. 13. Микроструктура поверхности контакта сплава с формой (связующее Remasol)

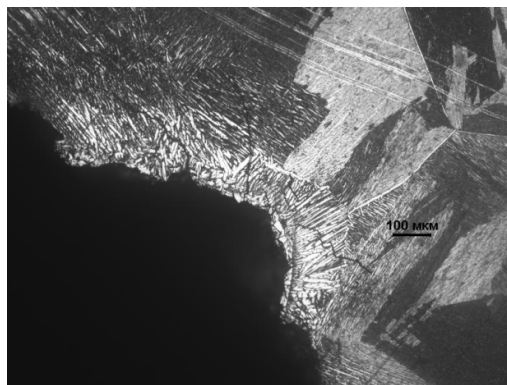
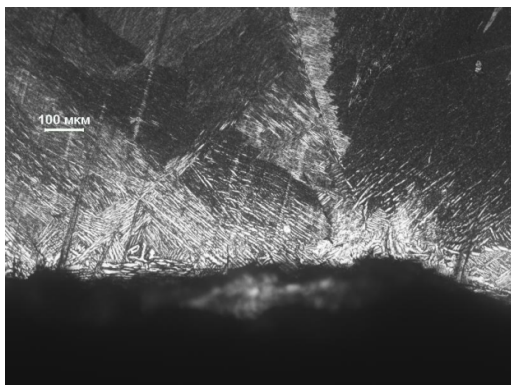


Рис. 14. Микроструктура поверхности контакта сплава с формой (связующее ЕНТ)

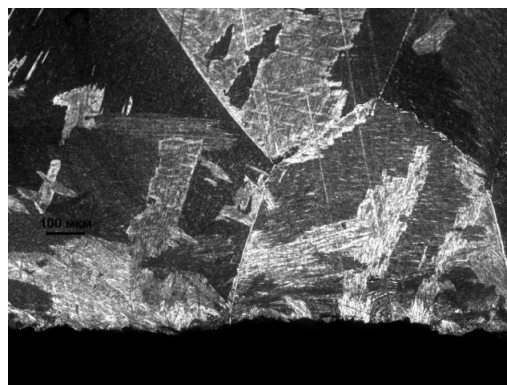
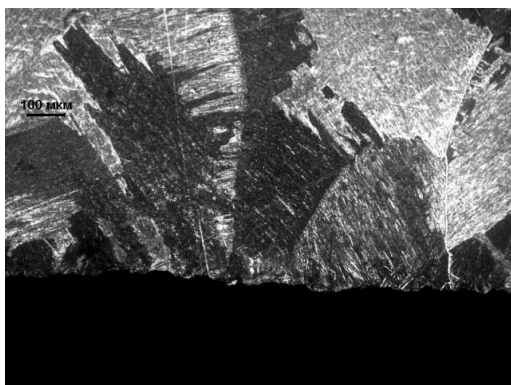


Рис. 15. Микроструктура поверхности контакта сплава с формой (связующее Remasol 5 % АСД)

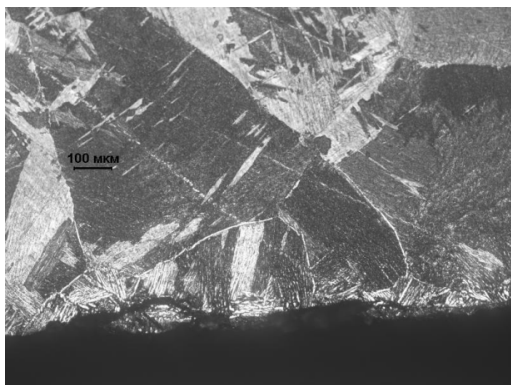


Рис. 16. Микроструктура поверхности контакта сплава с формой (связующее ЕНТ 5 % АСД)

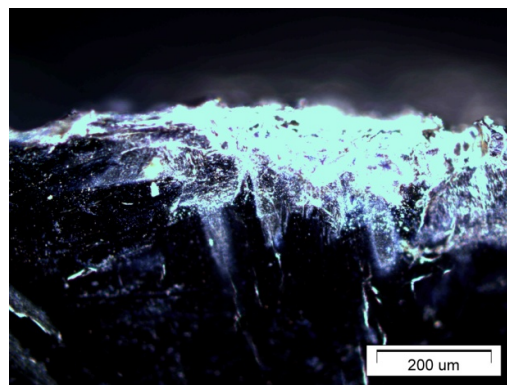
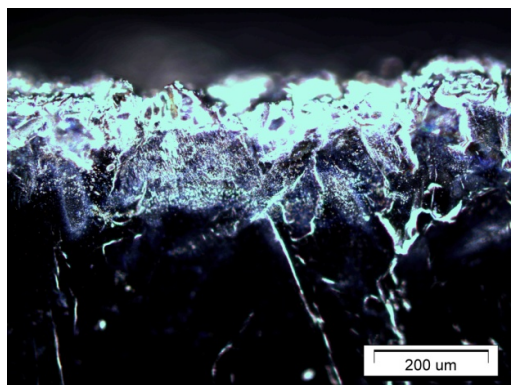


Рис. 17. Микроструктура поверхности контакта сплава с формой (связующее Армосил АМ)

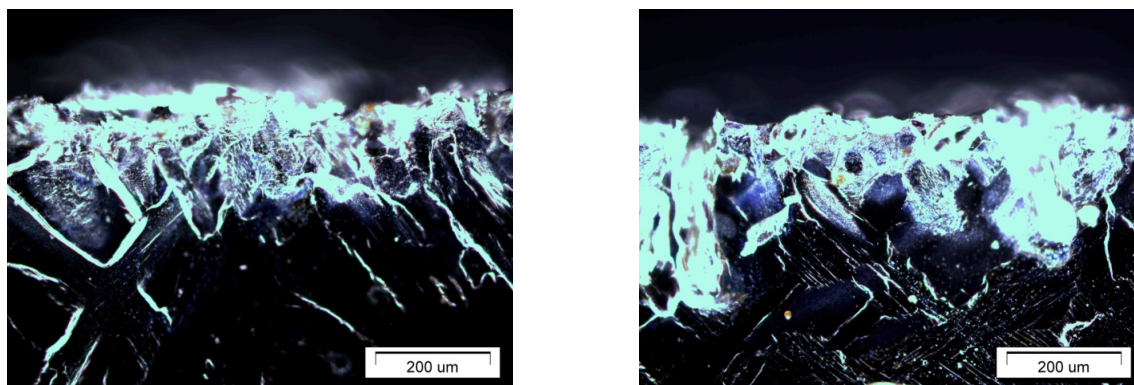


Рис. 18. Микроструктура поверхности контакта сплава с формой
(связующее Армосил для титановых сплавов)

Таблица 3

Результаты измерения альфированного слоя

Связующее	Величина альфированного слоя, мкм	
	Контакт с формой на основе кремнезоля	Контакт с формой на основе этилсиликата
Remasol	20	222
ЕНТ	222	222
Remasol 5 % АСД	15	215
ЕНТ 5 % АСД	181	239
Армосил АМ	219	210
Армосил для титановых сплавов	315	231

Исследования альфированного слоя показали:

1) при контакте титановых отливок с формами на основе связующего гидролизованного этилсиликата наблюдается альфированный слой;

2) на образцах, контактировавших с формами на основе связующих ЕНТ, Армосил АМ, Армосил для титановых сплавов также наблюдается альфированный слой, сопоставимый по глубине с формами на основе этилсиликата;

3) образцы, контактировавшие с формами на основе Remasol и Remasol с добавками, АСД-4 альфированного слоя не имеют.

Выводы

1. В качестве связующих для изготовления оболочковой формы для литья крупногабаритных титановых отливок согласно заявленному выше требованиям можно рекомендовать следующие связующие: Remasol с добавлением 5 % АСД-4 от массы суспензии ($\sigma_{20} = 38,35$ МПа) и Remasol с добавлением 7,5 % АСД-4 от массы суспензии ($\sigma_{20} = 42,47$ МПа).

2. Введение упрочняющей добавки АСД-4 не влияет на величину альфированного слоя у образ-

цов, изготовленных с применением связующего Remasol.

3. Анализ результатов проведенных исследований показал, что прокаливание оболочковых форм на основе водных связующих необходимо проводить при температуре ≥ 1200 °С.

4. На основании проведенных исследований разработана технологическая инструкция по изготовлению оболочковых форм на основе связующих Remasol, Remasol с добавкой 5 % АСД-4, Армосил АМ и Армосил АМ с добавкой 5 % АСД-4.

Проект выполнялся при поддержке Министерства образования и науки РФ, договор от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.0009.

Литература

1. ГОСТ 23409.7–78 Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Методы определения прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе.

2. Инструкция «Металлографический анализ титановых сплавов»: Утв. ВИАМ от 10 февраля 1974 г., № 1054-76.

Мухамадеев Ильшат Рифкатович, аспирант кафедры машин и технологии литейного производства, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; mitlp@ugatu.ac.ru.

Деменок Олег Борисович, канд. техн. наук, доцент кафедры машин и технологии литейного производства, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; dobor999@mail.ru.

Ганеев Альмир Амирович, д-р техн. наук, профессор кафедры машин и технологии литейного производства, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; mitlp@ugatu.ac.ru.

Павлинич Сергей Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой машин и технологии литейного производства, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; mitlp@ugatu.ac.ru.

Аликин Павел Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры машин и технологии литейного производства, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; mitlp@ugatu.ac.ru.

Поступила в редакцию 14 января 2015 г.

THE CHOICE OF WATER-BASED BINDER FOR SHELL MOLDS OF THE INVESTMENT CASTING OF TITANIUM ALLOYS

I.R. Mukhamadeev, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, mitlp@ugatu.ac.ru,

O.B. Demenok, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, dobor999@mail.ru,

A.A. Ganeev, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, mitlp@ugatu.ac.ru,

S.P. Pavlinich, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, mitlp@ugatu.ac.ru,

P.V. Alikin, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, mitlp@ugatu.ac.ru

The paper presents the studies of influence of various water-base binders, viz. EHT Binder (USA), Remasol (UK), Armosil of different modifications (Russia) on physical and mechanical properties of shell molds and alpha layer depth. The most perspective binders for casting of titanium alloys are defined. Data on interaction of the ASD-4 powder with water binders are obtained and recommendations of its percentage ratio for obtaining optimum properties are given.

All ceramic slurries were prepared by the same technology. The binder and filler were added to the mixer, stirred until homogeneous mixture of desired viscosity was obtained, and then the coating was formed by layering with a modeling unit. Dusting of units was carried out according to existing mass production technology.

In order to improve the strength characteristics of shell molds fine powder of aluminum ASD-4 was added to the slurry in an amount of 7.5 % of the filler weight.

Alpha layer depth was determined by microstructural analysis. Microsections were made from samples with access to the surface under investigation. Pieces for macro- and microsections were cut using abrasive wheels with a cooling environment.

On the basis of studies a technological instruction on making shell molds based on Remasol, Remasol with 5 % ASD-4, Armosil and Armosil AM with 5 % ASD-4 binders is developed.

Keywords: shell mould; water-based binder; alpha layer; fire-resistant suspension; titanium alloy; large-size castings.

References

1. GOST 23409.7-78. *Peski formovochnye, smesi formovochnye i sterzhnevye. Metody opredeleniya prochnosti pri szhatii, rastyazhenii, izgibe i sreze* [State Standart 23409.7-78. Moulding Sands, Moulding and Core Sand Mixtures. Methods for Determination of Compressive, Tensile, Bending and Shearing Strength].

2. *Instruktsiya "Metallograficheskiy analiz titanovykh splavov"*. No. 1054-76. [Instruction "Metallographic Analysis of Titanium Alloys". No. 1054-76.]. Moscow, VIAM, 1974.

Received 14 January 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Выбор связующих на водной основе для оболочковых форм литья по выплавляемым моделям титановых сплавов / И.Р. Мухамадеев, О.Б. Деменок, А.А. Ганеев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 95–104.

FOR CITATION

Mukhamadeev I.R., Demenok O.B., Ganeev A.A., Pavlinich S.P., Alikin P.V. The Choice of Water-Based Binder for Shell Molds of the Investment Casting of Titanium Alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 95–104. (in Russ.)