

УДК 621.74.045

**Е. А. Марковский, Е. В. Михнян, Ю. Г. Квасницкая,  
В. М. Симановский, Г. Ф. Мьяльница\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН, Украины, Киев  
\*ГП НПКГ “Зоря-Машпроект”

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЧС70 НА ЕГО СВОЙСТВА**

*Проведено исследование влияния температурно-временной обработки жаропрочного сплава ЧС70 на его свойства. Одним из перспективных вариантов обработки является циклическая температурно-временная обработка расплава, по режимам которой была выполнена выплавка сплава, что привело к улучшению структуры сплава и повышению общей и локальной прочности. Прочность возросла в 1,2-1,3 раза, жаропрочность – в 1,5-2,0 раза, ударная вязкость осталась примерно на том же уровне, выход годного литья увеличился с 18 до 75 %.*

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, структура и свойства сплавов, температурно-временная обработка.

*Проведено дослідження впливу температурно-часової обробки жароміцного сплаву ЧС70 на його властивості. Одним з перспективних варіантів обробки є циклічна температурно-часова обробка розплаву, по режимах якої була виконана плавка сплаву, що привело до поліпшення структури сплаву і підвищенню загальної і локальної міцності сплаву. Міцність зросла – в 1,2-1,3 рази, жароміцність – в 1,5-2,0 рази, ударна в'язкість залишилась приблизно на тому ж рівні, вихід придатного литва збільшився з 18 до 75 %.*

**Ключові слова:** жароміцні сплави, структура та властивості сплаву, температурно-тимчасова обробка.

*Research of influencing of temperature-temporal treatment on properties of the heatproof alloy GS70 is conducted. One of perspective variants of temperature-temporal treatment is cyclic temperature-temporal treatment of fusion, on the modes of which was executed smelting of alloy, that results in the improvement of structure of alloy and promotes general and local durability of alloy. Durability grew in 1,2-1,3 times, heatproof in 1,5-2,0 times, shock viscosity remained approximately at the same level. The output of the suitable casting from 18 to 75% was multiplied.*

**Keywords:** superalloys, structure and properties of alloys, temperature-temporal treatment.

**Д**ля авиа- и судостроения очень важна проблема повышения уровня физико-механических и технологических свойств жаропрочных сплавов. Эта проблема может решаться следующими путями: изменением химического состава сплава, применением все более сложных систем легирования и модифицирования [1-3], а

## Новые литые материалы

также посредством целенаправленного воздействия на металлургический процесс выплавки или переплава сплава. Более целесообразным представляется второй путь, так как современные жаропрочные сплавы и легированные стали содержат 10-20 легирующих компонентов, их массовая доля в сплаве достигает 20-30 %. Добавление новых компонентов и различная их комбинация уже не приводит к существенному улучшению свойств сплавов.

Жаропрочные сплавы и легированные стали в жидком состоянии представляют собой сложные гетерогенные системы с ярко выраженной химической макро- и микронеоднородностью. Это связано с наличием в расплавах сегрегаций, как правило, тугоплавких элементов и соединений. Термодинамически эти расплавы неравновесные, так как в процессе приготовления жаропрочные сплавы системы никель-хром не подвергаются нагреву свыше температуры 1600-1700 °С, то есть температура перегрева не достигает температуры плавления более тугоплавких компонентов основы – хрома, а тем более таких легирующих элементов, как молибден, вольфрам, ниобий. Время выдержки сплавов в жидком состоянии также ограничено и поэтому процессы растворения и массопереноса, имеющие диффузионный характер, не приводят к полной гомогенизации расплава по химическому составу как в микро-, так и макрообъемах [4, 5]. Степень нестабильности химической микро- и микронеоднородности определяется природой и составом исходной шихты, способом введения легирующих и модифицирующих элементов, способом выплавки, температурой перегрева и временем выдержки в жидком состоянии, скоростью кристаллизации и т. п. Микронеоднородность расплава мало меняется в сплаве в процессе охлаждения и кристаллизации, то есть сохраняется в твердом состоянии. Степень неоднородности сплава оказывает влияние на его свойства и структуру. Чем однороднее расплав, тем более стабильными, а зачастую и более высокими физико-химическими свойствами обладает сплав [6]. Таким образом, физико-химическое воздействие на расплав должно быть направлено на выравнивание химической неоднородности и приведение расплава в стабильное состояние. Наиболее простым и доступным методом является температурно-временная обработка (ТВО).

Выплавку металла для отливки образцов при оценке свойств сплавов без ТВО и после нее производили в вакуумной печи УППФЗМ. Температура расплавленного металла в плавках без ТВО составляла  $1650 \pm 10$  °С, выдержка металла при этой температуре – 50 с, охлаждение до температуры заливки –  $1570 \pm 10$  °С выдержка – 60 с, заливка. В плавках с ТВО расплавленный металл проходит обработку по режимам, приведенным на рис. 1. Одноцикловой режим: нагрев до 1750°С, выдержка до 4 мин;

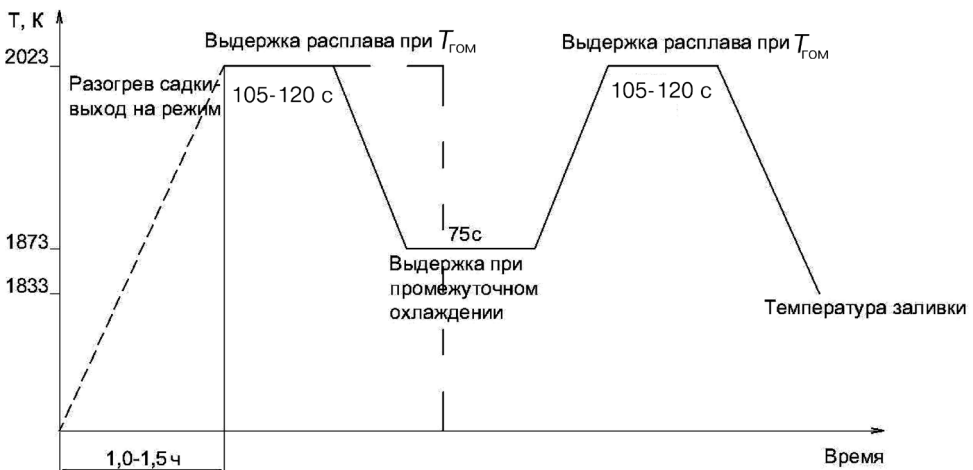


Рис. 1. Технологический режим термовременной обработки сплава марки ЧС70

двухцикловой: перегрев до 1750 °С, межцикловое охлаждение до 1600 °С, выдержка расплава. Заливку проводили в оболочковую керамическую форму.

При реализации температурно-временной обработки расплава температура максимального перегрева должна превышать температуру гомогенизации расплава на 20-30 °С и иметь регламентируемое время выдержки расплава при этой температуре перегрева, которое гарантировало бы заданный перегрев для всей порции расплавленного металла. Двухцикловая ТВО предусматривает двухразовый перегрев до температуры гомогенизации (+ 20-30 °С), охлаждение расплава до температуры межцикловое охлаждения и заливку металла после второго цикла перегрева.

ТВО сплава ЧС70 связана с его перегревом до 1750±10 °С. Такие высокие технологические перегревы могут сказываться на изменении химического состава сплава. Были определены химический состав шихты, сплава образцов и лопаток, полученных в плавках по обычной технологии и технологии с ТВО. Установили, что при переплаве сплава ЧС70 по технологии с ТВО его состав изменяется в пределах, допускаемых ТУ.

Анализ микроструктуры литых образцов и лопаток ГТД показал, что ТВО измельчает зерна сплава ЧС70. Это имеет место как в перо лопатки, так и в замке. Особенно это существенно для переходной зоны «перо-замок», где зерно меньше, чем в лопатках без ТВО. Структура металла плавков с ТВО и без нее приведена на рис. 2.

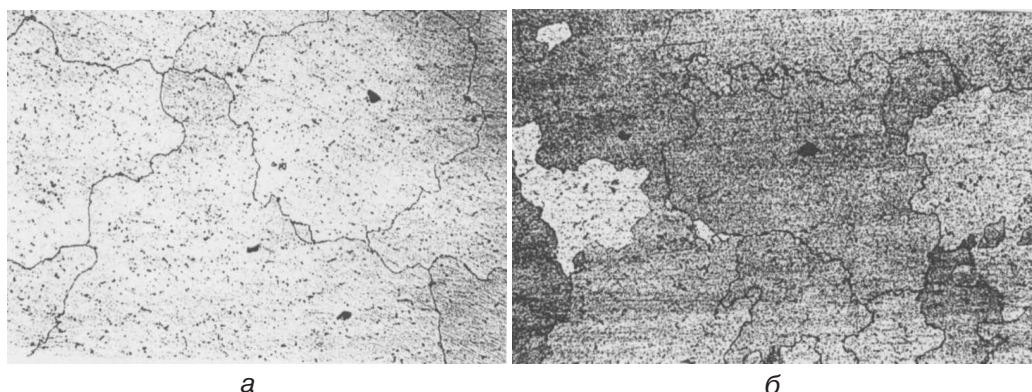


Рис. 2. Структура пера лопаток после различных режимов выплавки: а – без ТВО; б – после ТВО, ×100

Жаропрочные сплавы сохраняют дендритную структуру. В дендритных пространствах имеется эвтектическая фаза пластинчатого типа, которая представляет собой карбидную эвтектику сложного состава  $[(\text{Ni-Cr})+(\text{Ni}_3\text{Al})]$ . В сплаве присутствуют неметаллические включения, карбонитриды простой прямоугольной и трапециевидальной форм, которые расположены в осях дендритов и в межзосном пространстве участков. В структуре исследуемых сплавов имеется карбидная фаза, форма и размеры которой изменяются незначительно после термообработки литых изделий в твердом состоянии, которая для ЧС70 проводится согласно ТУ. Только воздействие на расплав при перегреве выше температуры гомогенизации (для ЧС70 составляет 1720±10 °С) позволяло изменять форму карбидных и карбонитритных включений. По всей вероятности этот способ управления формой и размерами карбидных и карбонитритных включений в сплавах типа ЖС может быть использован наряду с модифицированием сплавов. Перед последним он имеет следующее преимущество: легче реализуется и дает стабильные результаты по изменению структуры и свойств.

Для идентификаций выделений в межосном пространстве и в осях дендритов применялся метод цветного травления, который заключался в следующем: образец травился электролитическим способом реактивом для выявления карбидных фаз (методика разработана Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ), Москва).

Метод цветного химического травления дает возможность идентифицировать природу межосных выделений как выделение карбидной фазы. На форму и размеры карбидной (карбонитридной) фазы значительное влияние оказывает ТВО. В исходном материале без ТВО карбиды типа  $Me_{23}C_6$ ,  $Me_6C$ , а также смешанные карбиды (карбонитриды) локализируются вдоль межзеренной границы. Карбидная фаза после гомогенизации режимами ТВО становится компактной, большинство включений почти сферической формы. При этом, как показали исследования химической неоднородности сплавов типа ЖС, большинство карбидообразующих элементов входит в состав матрицы, упрочняя ее, избыток карбидообразующих в матрице сплава способствует выделению в ней мелкодисперсных карбидов. Особенно это важно для таких высокотемпературных компонентов, как молибден, вольфрам, ниобий, хром. Они большей частью после ТВО переходят в раствор, при этом выбывают из процесса карбидообразования, что обеспечивает более высокий уровень легирования твердого раствора. Этот факт подтверждает увеличение микротвердости лопаток, отлитых с ТВО.

ТВО позволяет повысить прочность сплава путем создания в кристаллической решетке большого количества упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, которые блокируют дислокации, что находит применение в практике при создании высокопрочных сталей и сплавов. Препятствиями для свободного перемещения дислокаций в кристаллической решетке могут служить не только  $\gamma'$ -фазы и дисперсные карбидные выделения, но и границы зерен и блоков.

Форма зерен влияет на характер микроструктуры и поэтому на свойства сплавов. Изменением режимов температурно-временной обработки можно формировать структуру литого металла в заданном направлении. Возрастание прочности как раз наблюдается тогда, когда происходит заметное уменьшение размеров зерен.

Сравнение полученных результатов прочности образцов, полученных без ТВО, и с ней показывает, что ТВО расплавов приводит к увеличению кратковременной прочности при  $T = 900$  °С на 10 %, на такую же величину увеличивалась и пластичность. Ни одна из приведенных плавок с ТВО не имела показателей ниже ТУ. Длительная прочность сплавов при температуре 900 °С и  $G = 250$  МПа составляла более 200 ч, то есть вдвое дольше, чем нижний предел ТУ, отдельные образцы простояли около 300 ч.

### Выводы

- Жаропрочные сплавы типа ЧС70 в процессе своего приготовления при выплавке не подвергается перегреву выше 1600 °С, то есть не достигается температура плавления второго компонента основы хрома, а тем более температуры плавления тугоплавких легирующих компонентов: вольфрама, молибдена, ниобия. Приготовление сплавов происходит при небольших перегревах над линией ликвидуса, при ограниченном времени выдержки, что препятствует разрушению атомных сегрегаций, прототипов эвтектики и интерметаллидов, содержащихся в расплаве. Этот факт оказывает существенное влияние на свойства литых изделий. Опираясь на закономерности изменения структурно-чувствительных свойств сплавов в жидком и твердом состояниях для изменения свойств и структуры в работе был использован

принцип температурно-временной обработки сплава ЧС70. В качестве процесса, приводящего к гомогенизации расплава ЧС70, использовалась температурно-временная обработка расплава с температурой перегрева  $1750 \pm 10$  °С, которая была определена из эксперимента по определению гистерезиса структурночувствительных свойств при нагреве-охлаждении. Для сплавов ЧС70 в качестве температурно-временной обработки расплава были выбраны перегревы выше температуры гомогенизации на 20-30 °С.

- Одним из перспективных вариантов температурно-временной обработки является циклическая температурно-временная обработка расплавов, по режимам которой были выполнены выплавка сплавов и отливка объектов исследования.

- Температурно-временная обработка (ТВО) расплавов жаропрочных сплавов ЧС70, содействуя их гомогенизации при объемной кристаллизации, способствует измельчению зерен структуры (в 1,5-2,0 раза), выравнивает размеры зерен структуры по сечению лопатки; карбидная фаза измельчается. Температурно-временная обработка уменьшила общее количество карбидной и карбонитридной фаз в сплаве, что привело к разрыву цепочек выделений высокотемпературных фаз по границам кристаллитов и к сужению этих границ. Произошло обеднение границ кристаллитов карбидными фазами из-за того, что высокотемпературные компоненты хрома, молибдена, вольфрама, ниобия частично выбывают из процесса карбидообразования. Увеличение микротвердости матрицы также свидетельствует об этом.

Улучшение структуры сплава повышает общую и локальную прочность сплавов. Прочность возросла в 1,2-1,3 раза, жаропрочность – в 1,5-2,0, ударная вязкость осталась примерно на том же уровне, выход годного литья увеличился в 1,5 раза.

- В работе также установлено, что принятые режимы ТВО с перегревом металла до  $1750 \pm 10$  °С не влияют на изменение химического состава сплава ЧС70 – практически угара нет. Однако общая сумма  $Al+Ti$  несколько ниже средней по ТУ, что в ряде случаев несколько снижает среднестатистические показатели прочности. Поэтому усовершенствование технологии в дальнейшем целесообразно за счет применения напуска аргона при режимах ТВО [7].



### Список литературы

1. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
2. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, – 1964. – 672 с.
3. Колотухин Э. В., Ларионов В. Н., Кулишов Е. А. Получение отливок с гарантированным уровнем качества // Литейн. пр-во. – 1988. – № 9. – С.11-12.
4. Авиационные материалы: Справочник. – М.: ВИАМ, 1975. – Т. 2. – 387 с.
5. Жидкая сталь / Под ред. Б. А. Баума. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
6. Кочегура Н. М. Температурно-временное воздействие на никелевые жаропрочные сплавы в жидком состоянии // Спецэлектрометаллургия. – 1986. – № 60. – С. 23-27.
7. Пат. 63290678 Японии, МКИ В22Д27/08, В22Д27/13. Способ точного литья / Морита Нобору. – Оpubл. 28.11.1988.

Поступила 09.08.2010