

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ЛИТЫХ ШТАМПОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ 950–1000 °С, И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ ПРИ ШТАМПОВКЕ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

О.Б. Деменок, А.А. Ганеев, А.О. Деменок, Б.А. Кулаков

Статья посвящена литым деталям штампов, которые эксплуатируются в сложных термомеханических условиях при высоких температурах. Основными причинами их выхода из строя является износ гравюры штампа, смятие элементов гравюры и разгарные трещины. Изучение механизма образования данных дефектов в теле литого штампа позволит создать сплавы с высокой термостойкостью и увеличить ресурс штампов при изотермическом деформировании.

Ключевые слова: штамп литой, износ штампа, гравюра штампа, сверхпластичность титановых сплавов, смятие штампа, изотермическое деформирование.

В авиационной промышленности при изготовлении газотурбинных двигателей большое распространение получили детали из труднодеформируемых сплавов. Поэтому современное развитие кузнечно-штамповочного производства предъявляет повышенные требования к штамповой оснастке, что вызвано широким применением операций штамповки в жестких термомеханических условиях и распространением горячей штамповки труднодеформируемых материалов.

Использование литых штампов для данных условий эксплуатации является наиболее целесообразным с экономической точки зрения, так как снижается трудоемкость их изготовления за счет снижения или полного устранения механической обработки.

Однако достигнутый уровень механических свойств никелевых жаропрочных лопаточных сплавов не отвечает в полной мере условиям эксплуатации штампов и не позволяет обеспечить требуемый ресурс их работы. Стойкость оснастки при изотермическом деформировании составляет в настоящее время 250–300 штамповок на комплект.

Практическое применение процесса высокотемпературного изотермического деформирования металлов с помощью инструмента, нагреваемого до температуры 700–1000 °С, вызвало необходимость решения принципиально новых проблем: изыскания штамповых материалов, способных работать в условиях длительного нагрева при высоких температурах и нагрузках.

В связи с этим можно указать на следующие основные условия эксплуатации литого штампового инструмента [1]:

1. Высокий разогрев, вследствие длительного контакта с заготовкой, когда поверхностные слои рабочих частей штампов разогреваются до 800–1000 °С.

2. Циклическое температурно-силовое воздействие. В теле штампа возникает сложно-напря-

женное состояние в результате наложения термических напряжений и напряжений, вызванных сопротивлением деформируемого материала.

3. Высокое давление на инструмент. Кроме того, циклический температурно-силовой режим работы инструмента вызывает изменение свойств участков гравюры, прилегающих к рабочим поверхностям.

Основные виды повреждений литого штампового инструмента определяются температурно-силовым воздействием, а также вызванными им структурными изменениями приконтактных участков материала штампа [1, 2].

Основные повреждения гравюры литых штампов, работающих при горячей штамповке, можно классифицировать следующим образом:

1. Износ участков гравюры, приводящий к изменению размеров штамповой полости вследствие удаления с ее поверхности слоя металла. Выделяют следующие виды износа: абразивный, адгезионный, окислительный [3–6].

2. Пластическая деформация (смятие) элементов гравюры, приводящая к изменению ее размеров и формы, которая во многом определяется разупрочнением приконтактных участков материала штампов (рис. 1).

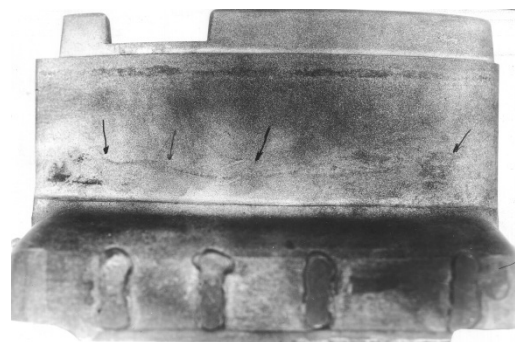


Рис. 1. Внешний вид детали штампа с дефектом «смятие»

3. Возникновение трещин термомеханического характера, приводящее к образованию сетки разгара, объясняющееся значительным градиентом температур по сечению инструмента [7] (рис. 2).



Рис. 2. Вид трещин термомеханического характера на макроструктуре штампа

4. Возникновение усталостных трещин в результате воздействия циклических механических нагрузок (рис. 3).

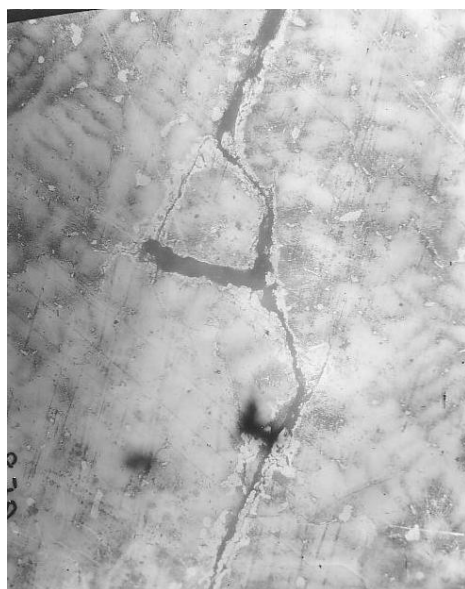


Рис. 3. Вид термоусталостных трещин на микроструктуре штампа, $\times 100$

В работе [8] приводится анализ частоты появления тех или иных повреждений гравюры штампов в процессе эксплуатации на молотовых прессах. В порядке возрастания частоты повреждения они расположились следующим образом: образование разгарных трещин, пластическая деформация, усталостные трещины, износ.

На основании вышеприведенных особенностей и условий эксплуатации штампового инструмента можно сформулировать ряд основных требований, которым должен отвечать материал для изготовления литой штамповой оснастки:

- 1) прочность (предел текучести) – для сохранения формы штампа при повышенных давлениях;
- 2) вязкость – для предупреждения поломок и выкрашивания;
- 3) разгаростойкость (сопротивление термической усталости) – для предупреждения трещин,

возникающих при многократном чередовании нагрева и охлаждения;

4) износостойкость – для сохранения размеров гравюры и обеспечения долговечности работы штампа;

5) жаростойкость (сопротивление коррозии) – при повышенных рабочих температурах для уменьшения окислительного износа гравюры штампа;

6) теплопроводность – для лучшего отвода тепла, передаваемого деформируемой заготовкой;

7) малая чувствительность к местным нагревам – для предупреждения локальных перегревов;

8) горячая твердость – для обеспечения устойчивости материала против истирания при высоких температурах.

Таким образом, литые штамповые материалы должны обладать комплексом физико-механических свойств, обеспечивающих штамповку труднодеформируемых материалов.

При традиционной штамповке обычно имеет место три основных вида износа гравюры штампа: смятие, истирание и разгарные трещины [3].

Можно выделить ряд особенностей износа штампов при изотермическом деформировании заготовок с использованием эффекта сверхпластичности, хотя в настоящее время нет общепринятых и научно обоснованных эффективных критериев достоверной оценки износа гравюры штампа при высоких температурах эксплуатации.

Условия эксплуатации литого штампа, обусловленные режимом сверхпластического деформирования заготовки, от традиционных методов штамповки отличаются рядом особенностей [9]:

1) штамповка производится в изотермических условиях при рабочих температурах $950\text{ }^{\circ}\text{C}$;

2) процесс деформирования происходит при пониженных скоростях $0,05\text{--}0,1\text{ м/с}$, что обуславливает длительное время контакта заготовки с инструментом (до 2 мин за один цикл штамповки);

3) удельная нагрузка при штамповке составляет не более 400 МПа . Эти особенности вызывают и особый характер взаимодействия контактных поверхностей. В зоне стыка трущихся пар (триад) имеет место пластический или вязко-пластический контакт. Причем длительный, от одной до нескольких минут, контакт между штампом и заготовкой, при действии высоких изотермических температур и давлений, резко активизирует процессы ползучести, адгезии и окисления, что в совокупности приводит к следующим преобладающим видам интенсивного износа инструмента: адгезионно-механическому износу и пластической деформации гравюры. Так согласно исследованиям, до $70\text{--}80\%$ штампов нельзя использовать вследствие адгезионного износа и смятия гравюры [7, 10].

Свойства, оказывающие влияние на износ, определяют виды испытаний, необходимых для оценки износа штамповых материалов. При ИЗШ

основными требованиями, предъявляемыми к штамповым материалам, следует считать высокотемпературную прочность, жаропрочность, жаростойкость, горячую твердость и износостойкость. Конфигурация, размеры и схемы нагружения образцов для различных видов испытаний выбираются из условия максимального соответствия режимам эксплуатации штампа.

Влияние на износ инструмента показателей основных свойств гравюры штампа, исходя из большого объема экспериментальных данных, является довольно трудоемкой задачей. Поэтому моделирование основных, наиболее характерных воздействий, определяющих износ гравюры штампов на несложном лабораторном оборудовании, представляет большой практический и теоретический интерес.

Поэтому штамповые материалы для изотермического деформирования и режима сверхпластичности должны быть жаропрочными, износостойкими и жаростойкими, обладать высокой горячей твердостью.

Частично удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу штампов для изотермического деформирования титановых сплавов, жаропрочные никелевые сплавы, используемые при литье лопаток газотурбинных двигателей, но их основной недостаток – низкая износостойкость при штамповке в условиях сверхпластичности. Поэтому разрабатываемые материалы, для штамповой оснастки, работающей в режиме изотермической штамповки и сверхпластичности, должны иметь следующие характеристики: износостойкость, не более $140 \cdot 10^{-4}$ г при температуре испытания 975 °С и удельной нагрузке на образцы 230 МПа;

– жаропрочность материала σ_{100} не менее 150 МПа;

– горячая твердость при 975 °С и нагрузке 5000 Н, не менее 1100 МПа.

При испытании сплавов на горячую твердость была выявлена эффективность дисперсного уп-

рочнения никелевых сплавов тугоплавкими соединениями карбидов (рис. 4). Так, при упрочнении сплава карбидом титана его горячая твердость возрастает до 1962 МПа, тогда как у сплава, не упрочненного дисперсными соединениями, она составляет 1423 МПа. Происходит рост горячей твердости с увеличением количества дисперсного упрочнителя. Зависимости горячей твердости от количества дисперсного упрочнителя приведены на рис. 4. Динамика изменения свойств не меняется с ростом температуры, а также с увеличением объема дисперсных соединений в сплаве. Наиболее высокие значения горячей твердости имеют сплавы, упрочненные карбидом титана и карбидом тантала. Увеличение свойств с ростом количества дисперсного упрочнителя объясняется изменениями в структуре исследуемых сплавов. Чем больше количество дисперсного упрочнителя, тем эффективней тугоплавкие соединения взаимодействуют с подвижными дислокациями, формируя таким образом более плотную дислокационную структуру.

Повышение механических свойств сплава при его дисперсном упрочнении объясняется изменениями в структуре сплава, которые появляются за счет введения в состав сверхтвердых тугоплавких частиц.

В литом сплаве ЖСИ-95 (рис. 5), распределение частиц интерметаллидной фазы неоднородное. Дисперсность частиц также неодинакова. Имеются довольно грубые включения первичной γ' -фазы, расположенные в междендритных пространствах и высокодисперсные частицы вторичной γ' -фазы, расположенные в осях дендритов. Около первичных выделений γ' -фазы наблюдается значительное количество карбидов в виде «китайских иероглифов». При электронно-микроскопическом анализе установлено, что вторичные выделения γ' -фазы имеют неправильную кубическую форму и неравномерно распределены в матрице (рис. 5, г).

Сплав, упрочненный карбидом титана 1,5 %, имеет равноосную структуру (рис. 6), но размеры

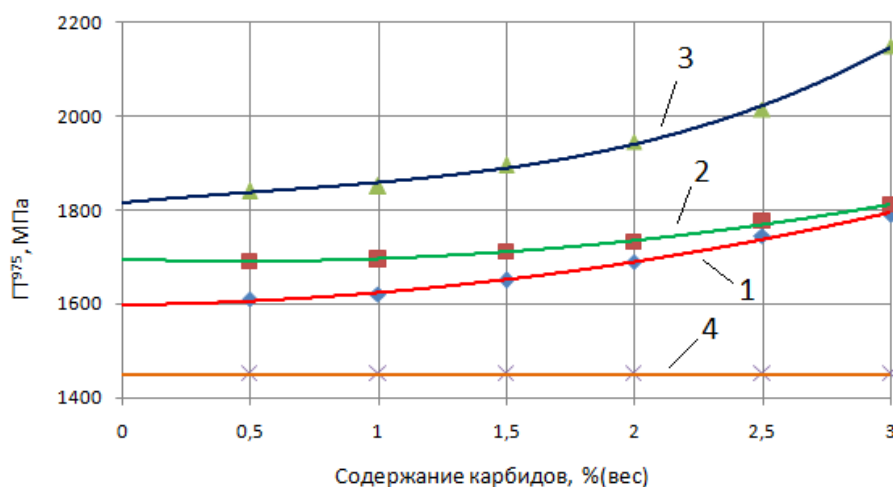


Рис. 4. Зависимость горячей твердости сплава ЖСИ-95 от вида и количества дисперсного упрочнителя: 1 – ЖСИ-95 + TaC; 2 – ЖСИ-95 + TiC; 3 – ЖСИ-95 + NbC; 4 – ЖСИ-95

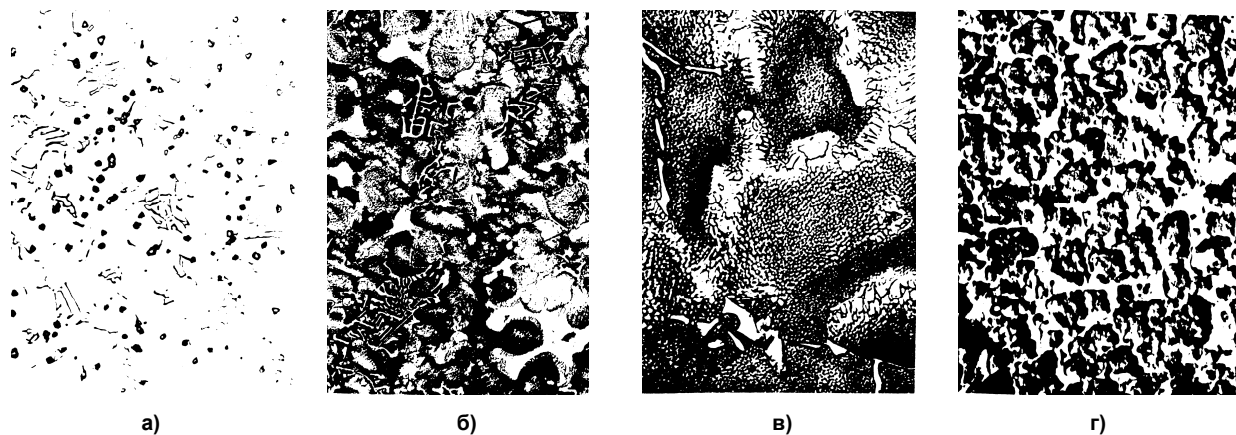


Рис. 5. Микроструктура сплава (без дисперсного упрочнения) ЖСИ-95:
а – без травления, $\times 125$; б – травление, $\times 125$; в – травление, $\times 500$; г – реплика, $\times 14\ 000$

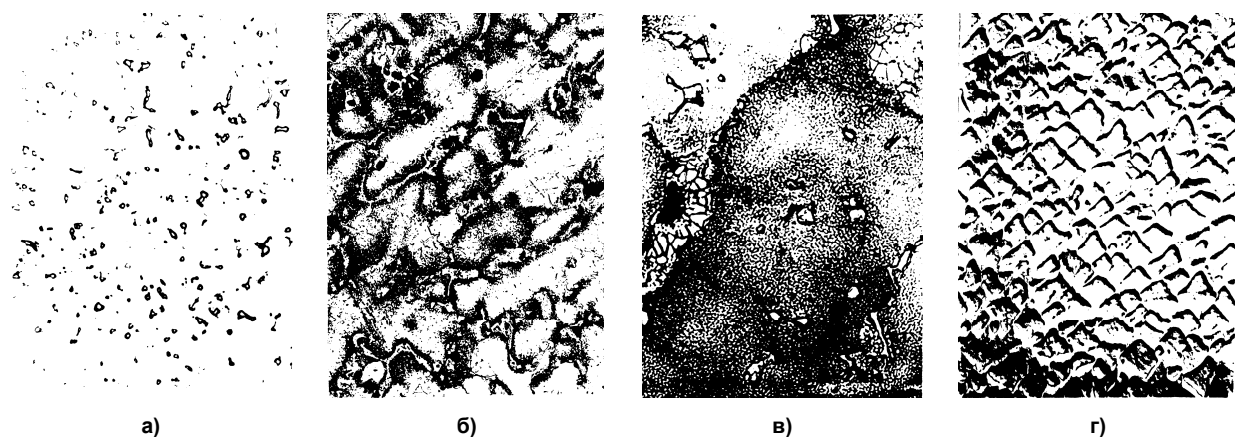


Рис. 6. Микроструктура сплава ЖСИ-95 + TiC (1,5 %):
а – без травления, $\times 125$; б – травление, $\times 125$; в – травление, $\times 500$; г – реплика, $\times 14\ 000$

дендритных ячеек меньше, чем у исходного сплава без дисперсного упрочнения.

Карбиды глобулярной формы расположены преимущественно по осям дендритных ячеек более равномерно. Выделения вторичной γ' -фазы более правильной формы и большей дисперсности равномерно распределены в матрице (рис. 6, в).

Структурные исследования показали, что у дисперсно-упрочненного сплава объемное содержание первичной интерметаллидной γ' -фазы возрастает. Дисперсность ее при этом увеличивается (рис. 6, в). Вторичная γ' -фаза имеет более правильную кубическую форму и равномерно распределена по матрице (рис. 6, г). Структурные исследования сплавов, упрочненных тугоплавкими дисперсными соединениями, показали, что изменение морфологии карбидной фазы, а также изменения в субзеренной структуре значительно изменяют физико-механические свойства исследуемых дисперсно-упрочненных сплавов.

Сплав ЖСИ-95, упрочненный карбидом титана (1,5 %) и карбидом тантала (0,5 %), обозначен ЖСИ-95ДУ (жаропрочный сплав износостойкий дисперсно-упрочненный) [11]. В микроструктуре сплава ЖСИ-95ДУ крупных избыточных фаз не наблюдается, а сплав ЖС-6У имеет дендритное

строение с типичным для такой структуры неоднородным распределением легирующих элементов (рис. 7). В термически обработанных сплавах присутствуют такие же фазы, что и в сырых. Горячие длительные испытания при температурах выше $900\ ^\circ\text{C}$ не вносят существенных изменений в структуру сплавов – присутствуют такие же фазы, но отмечается некоторое увеличение количества карбидной фазы по границам зерен. Проведенный металлографический анализ с ориентацией фаз позволил проследить за кинетикой фазовых превращений и установить, что в результате длительных испытаний в сплавах ЖС-6У и ЖСИ-95ДУ не происходит полного растворения фаз и образования новых, а разупрочнение сплавов при длительных испытаниях ($T=975\ ^\circ\text{C}$, $\sigma=200\ \text{МПа}$) происходит за счет коагуляции упрочняющих фаз.

Исследования на износ при $T=975\ ^\circ\text{C}$ и давлении на контакте $P=200\ \text{МПа}$, скорости вращения $n=30\ \text{об/с}$ показали, что для сплава ЖС-6У износ составил $110 \cdot 10^{-4}\ \text{г}$, а ЖСИ-95ДУ – $45 \cdot 10^{-4}\ \text{г}$. На рис. 8 приведена зависимость износа от времени испытания.

Горячая твердость образцов из сплава ЖС-6У составила 1123 МПа, а ЖСИ-95ДУ – 1628 МПа.

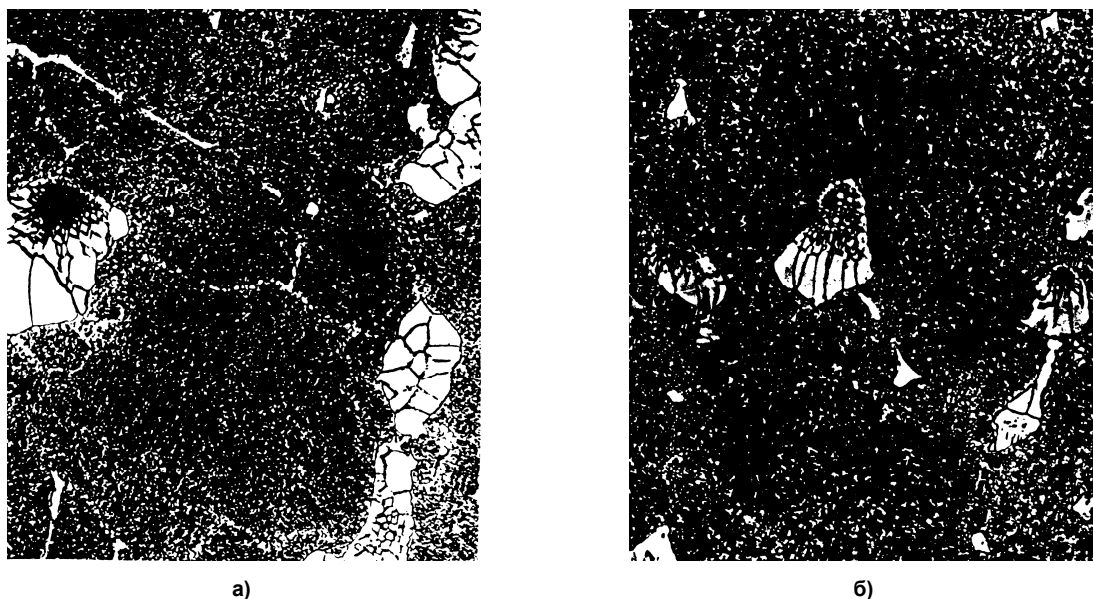


Рис. 7. Структура сплавов после травления, $\times 500$: а – ЖС-6У; б – ЖСИ-95ДУ

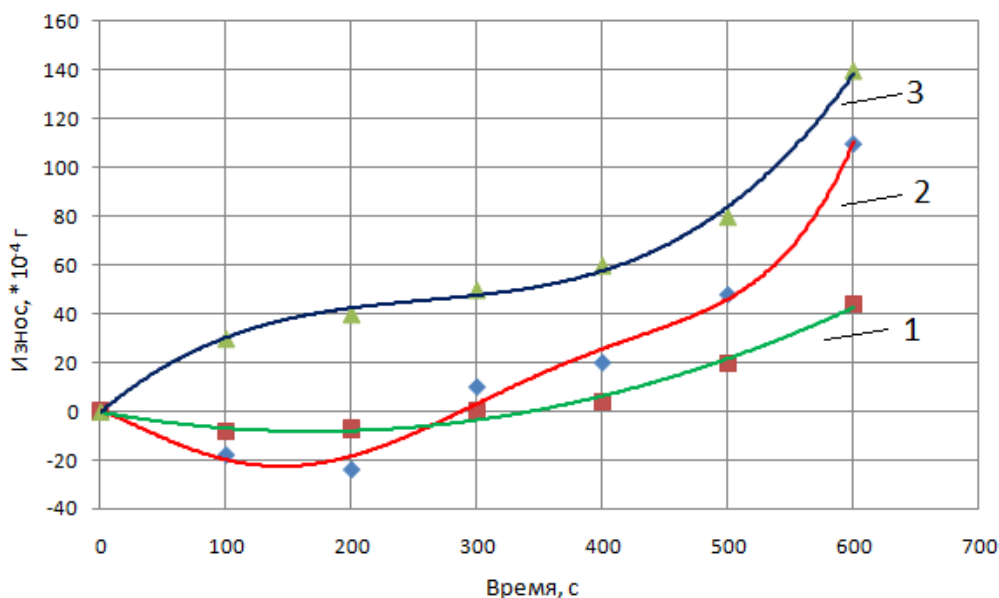


Рис. 8. Зависимость износа штамповых материалов от времени испытания:
1 – ЖСИ-95ДУ; 2 – ЖС-6У; 3 – ЖС-6К

Преимуществом сплава ЖСИ-95ДУ по сравнению с серийным ЖС-6У является более высокая жаропрочность и стабильность структуры при температуре 975 °С и напряжении $\sigma = 200$ МПа.

Сопоставление механических свойств сплавов ЖСИ-95ДУ и ЖС-6У при комнатной и рабочей температурах показывают, что они обладают высокими прочностными характеристиками, которые практически не изменяются в интервале температур 20–900 °С и при 900 °С снижаются всего на 15–20 % по сравнению с соответствующими значениями предела текучести и временного сопротивления при комнатной температуре.

При более высоких температурах испытаний (950–1050 °С) разупрочнение сплава ЖСИ-95ДУ

происходит более медленно, в результате его прочностные показатели выше, чем у сплава ЖС-6У. Это свидетельствует о том, что совместное упрочнение сплава на никелевой основе тугоплавкими дисперсными соединениями, при оптимальном легировании (ЖСИ-95ДУ) приводит к сохранению высокой прочности до более высоких температур, чем простое легирование (ЖС-6У).

Полученные результаты показывают, что сплав ЖСИ-95ДУ обладает наиболее высокими механическими, жаропрочными и литейными свойствами по сравнению со сплавом ЖС-6У и может быть рекомендован к производственному опробованию.

Литература

1. Позняк, Ю.А. Штамповые стали / Ю.А. Позняк, Ю.М. Скрынченко, С.И. Тишаев. – М.: Металлургия. – 1980.
2. Куниловский, В.В. Литые штампы для горячего объемного деформирования / В.В. Куниловский, В.К. Крутиков. – М.: Машиностроение. – 1987.
3. Исследование стойкости штампов для горячей штамповки // Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства: Экспресс-информ. – 1980. – № 5, реф. 21. – С. 1–8; № 6, реф. 23. – С. 1–31.
4. Миронов, Л.Н. Модельное исследование абразивного износа ковочных штампов / Л.Н. Миронов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1975. – № 6. – С. 16–18.
5. Свойства и износостойкость штамповых сталей // Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства: Экспресс-информ. – 1980. – № 18, реф. 76. – С. 18–26.
6. Toshio, M. Defects of steels for metal molds and their prevention steels for hot-pressing dies and forging dies / M. Toshio // Special Steel. – 1976. – Vol. 25, no. 8. – P. 22–35.
7. Бельский, Е.И. Стойкость кузнечных штампов / Е.И. Бельский. – Минск: Наука и техника. – 1975.
8. Состояние и пути развития штамповочного производства // Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства: Экспресс-информ. – 1978. – № 33, реф. 171. – С. 1–8.
9. Кайбышев, О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О.А. Кайбышев. – М.: Металлургия. – 1975.
10. Heinemeyer, D. Praxisorientierte Typologie für Gesenkschaden. Grundlage für die Erfassung und Verbesserung der Standmenge von Gesenken / D. Heinemeyer, J. König // Industrie-Anzeiger. – 1976. – Bd. 98, Nr. 77. – S. 1369–1373.
11. Пат. 2130088 РФ, МПК C22 C19/05. Жаропрочный сплав на основе никеля / А.А. Ганеев, О.Б. Деменов, И.Ю. Лобарев, В.С. Жернаков. – Заявл. 23.10.97; опубл. 1999, Бюл. № 24.

Деменов 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.

Деменова Анна Олеговна, аспирант кафедры машин и технологии литейного производства, Уфимский государственный авиационный технический университет (г. Уфа); nu5tochka@mail.ru.

Кулаков Борис Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии и литейного производства, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); kul@lit.susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 17 февраля 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Metallurgy"
2014, vol. 14, no. 1, pp. 41–47

ANALYSIS OF WORKING CONDITIONS OF CAST MATERIALS OPERATING AT 950–1000 °C AND REQUIREMENTS FOR STAMPING IN ISOTHERMAL CONDITIONS

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,

A.O. Demenok, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, nu5tochka@mail.ru,

B.A. Kulakov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, kul@lit.susu.ac.ru

The article is devoted to stamp cast parts which are operating in complex thermo-mechanical conditions at high temperatures. Main causes of their failure are stamp gravure wear, gravure elements collapse and thermal fatigue cracks. Research of the formation mechanism of these defects in a solid cast stamp will enable to manufacture high heat resistance alloys and to extend the stamp life during isothermal deformation.

Keywords: cast stamp, stamp wear, stamp gravure, superplasticity of titanium alloys, crushing of stamp, isothermal deformation.

References

1. Poznyak Yu.A., Skrynchenko Yu.M., Tishaev S.I. *Shtampovye stali* [Die Steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 244 p.
2. Kunitlovskiy V.V., Krutikov V.K. *Litye shtampyy dlya goryachego ob"emnogo deformirovaniya* [Cast Dies for Bulk Hot Forming]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 126 p.
3. [Investigation of Durability of Hot Forming Dies]. *Tekhnologiya i oborudovanie kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva: Ekspress-informatsiya* [Technology and Equipment of Forging and Stamping: Express Information], 1980, no. 5, abstract 21; no. 6, abstract 23. (in Russ.)
4. Mironov L.N. [Model Investigation of Abrasive Wear of Forging Dies]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo* [Forging and Stamping], 1975, no. 6, pp. 16-18. (in Russ.)
5. [Properties and Wear Resistance of Die Steels]. *Tekhnologiya i oborudovanie kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva: Ekspress-informatsiya* [Technology and Equipment of Forging and Stamping: Express Information], 1980, no. 18, abstract 76. (in Russ.)
6. Toshio M. Defects of Steels for Metal Molds and Their Prevention Steels for Hot-Pressing Dies and Forging Dies. *Special Steel*, 1976, vol. 25, no. 8, pp. 22–35.
7. Bel'skiy E.I. *Stoykost' kuznechnykh shtampov* [Durability of Forging Dies]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1975.
8. [Current State and Ways of Development of Stamping]. *Tekhnologiya i oborudovanie kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva: Ekspress-informatsiya* [Technology and Equipment of Forging and Stamping: Express Information], 1978, no. 33, abstract 171. (in Russ.)
9. Kaibyshev O.A. *Plastichnost' i sverkhplastichnost' metallov* [Plasticity and Superplasticity of Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975.
10. Heinemeyer D., Konig J. Praxisorientierte Typologie für Gesenkschaden. Grundlage für die Erfassung und Verbesserung der Standmenge von Gesenken. *Industrie-Anzeiger*, 1976, Bd. 98, Nr. 77, S. 1369–1373.
11. Ganeev A.A., Demenov O.B., Lobarev I.Yu., Zhernakov V.S. *Zharoprochnyy splav na osnove nikelya* [Nickel-Base Heat-Resistant Alloy]. Patent RF, no. 2130088, 1999.

Received 17 February 2014