

О. Н. Хорошилов, д-р техн. наук  
А. А. Павлова, канд. техн. наук

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков, Украина  
e-mail: [horol@i.ua](mailto:horol@i.ua)

## НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ НЕПРЕРЫВНО ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

**Ключові слова:** нормативне забезпе-  
чення, інтервал кристалізації заготов-  
ки, повзучість, довготривала міцність.

**Анотація.** Розглянуто спосіб випробування зразків в температур-  
ному інтервалі кристалізації на повзучість та довготривалу міц-  
ність. Запропонований пристрій для випробування зразків в темпе-  
ратурному інтервалі кристалізації на повзучість та довготривалу  
міцність. Представлена методика процесу випробувань, що дозво-  
ляє збільшити точність вимірювань.

### Введение

Способ непрерывного литья заготовок из медных сплавов во всем мире признан наиболее пер-спективным малоотходным способом производства заготовок из металлов и сплавов. В последние 20-30 лет процесс производства медных сплавов происходит в направлении создания процессов непре-рывного литья. Медные сплавы обладают следующими свойствами: вязкость, пластичность, прочность.

Одним из основных факторов, влияющих на качество заготовок, является накопление повреж-даемости за время циклического движения заготовки в кристаллизаторе. В процессе непрерывного литья заготовка подвергается охлаждению, воздействию растягивающих усилий, что приводит к по-явлению напряжений в теле заготовки. Кроме того, в затвердевающей непрерывно-литой заготовке существует вязкий участок, который подвержен деформации ползучести и повреждаемости, что при-водит к возникновению несплошностей и микротрещин в заготовке. Ползучесть относится к особому виду разрушения конструкционных материалов, которая приводит к разрушению материала как в те-чение короткого времени: часы минуты (при высоких напряжениях и температуре в сечении образ-ца), так и длительного времени: месяцы, годы (при невысоких напряжениях и температурах испыты-ваемых образцов).

Ползучесть и длительная прочность определяют материал, который обладает реологическим состоянием. Ползучесть и длительная прочность применяются в основном для определения деформа-ции и работоспособности ответственных деталей в машиностроении, авиастроении, атомной энерге-тике и других отраслях техники [1].

### Постановка проблемы

В настоящее время имеется множество различных методик определения усадки металлов и сплавов. Однако их недостатками является то, что они рассчитаны на определение коэффициента усадки металлов и сплавов в температурном интервале от температуры заливки до температуры ок-ружающей среды, а значит, не дают информации о характере изменения линейного коэффициента при усадке в температурном интервале кристаллизации.

К основной проблеме определения высокотемпературной ползучести медных сплавов в темпе-ратурном интервале  $(0,9-0,95)T_L$  следует отнести отсутствие стандартного оборудования.

### Анализ исследований и публикаций

Для определения количественных значений параметров накопленной повреждаемости заготов-ки была разработана теория континуальной повреждаемости. Основу данной теории положили опре-деляющие уравнения Работнова-Качанова [2,3].

Реологическое состояние вязкого участка непрерывно-литой заготовки может быть представле-но рядом функций зависимости от температуры ( $T$ ) и напряжения ( $\sigma$ ) таких величин как деформация при ползучести ( $c$ ) и длительная прочность ( $\sigma_*$ )

$$c = \beta_0 \cdot \sigma^n \cdot \exp(k_1 \cdot T) t,$$

$$\sigma_* = \frac{K_0 \cdot \exp(k_2 T)}{t_*^m},$$

где  $c$  – ползучесть испытываемого образца, м;  $\sigma$  – напряжение в образце, МПа;  $\sigma^*$  – длительная прочность – напряжение, которое в течение времени  $t^*$  вызовет разрушение образца, МПа;  $T$  – температура испытаний, °С;  $t$  – текущее время;  $\beta_0, k_0, n, m, k_1, k_2$  – эмпирические коэффициенты.

В литературных источниках [4] приведены данные о механических испытаниях металлов и сплавов в температурном интервале эксплуатации. Однако в работе [5] показано, что медные сплавы, в том числе бронзы, при температурах 800-850 °С имеют склонность к хрупкому излому. Это усложняет проведение испытаний медных сплавов в температурном интервале кристаллизации.

В работе [6] показано сравнение экспериментальных данных с расчетными кривыми. Проведенный анализ и сравнение экспериментальных и расчетных данных позволил сделать вывод об удовлетворительной точности найденных коэффициентов для определения значения параметра повреждаемости с помощью уравнений Бейли – Нортон и Работнова – Качанова [7].

В работе [8] проведен анализ и выполнено прогнозирование усталостной прочности при циклическом нагружении, а в работе [9] описан прибор для определения усадки сплошных цилиндрических образцов из металлов и сплавов. Он позволяет определить усадку цилиндрического образца в интервале от температуры плавления до комнатной температуры. Сущность методики измерения усадки состоит в том, что между исследуемым цилиндрическим образцом и прибором, фиксирующим изменение длины образца, используют промежуточный элемент – стальной стержень (СС) для их теплового разделения. К недостатку относится то, что СС при нагревании расширяется и вносит искажения в результаты измерения, особенно в начальной стадии эксперимента. Фиксирование температурного режима СС и его термического расширения известная методика не предусматривает.

Однако при изменении конструкции устройства можно повысить точность показаний усадки и коэффициента линейного расширения (КЛР) сплава. Разработка нормативного обеспечения определения ползучести непрерывно литых заготовок из медных сплавов на испытательной машине АИМА 5-2 позволит увеличить точность измерений.

#### **Формулировка целей статьи**

Цель работы – создание нормативного обеспечения определения ползучести непрерывно литых заготовок из медных сплавов на основе усовершенствования конструкции испытательной машины АИМА 5-2 для определения ползучести медных сплавов в интервале температур  $(0,9 \dots 0,95)TL$ .

#### **Разработка нормативного обеспечения определения ползучести непрерывно литых заготовок из медных сплавов на испытательной машине АИМА 5-2**

Граничные условия, приведенные в работе [10], являются общими для многих задач по определению температурных полей. Поэтому следующие граничные условия примем за основу при решении задачи определения температурных полей:

- по всей длине МНЛЗ задать граничные условия теплового взаимодействия между поверхностью заготовки, расплавом, графитовой втулкой кристаллизатора и окружающей средой;
- моделирование проводить для заданного интервала скоростей движения заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ;
- в модели применялось ограничение скорости движения воды в водоохлаждаемом кожухе кристаллизатора при непрерывном литье заготовок из медных сплавов;
- температуру поверхности заготовки после выхода ее из кристаллизатора регулировали расходом воды.

Реализация модели осуществлялась численным методом расщепления по координатам (невная схема), методом переменных направлений и прогонки.

С помощью критериев Фишера, Стьюдента и Манны–Уитни проверялась адекватность модели по сходимости расчетных значений температур поверхности слитка с экспериментальными температурами, измеренными на МНЛЗ N 3,4 ККЦ АО «ММК» с помощью пирометра COMET 1000 IR–ANIS 600~3000 (Япония) с диапазоном измерения температур 600—3000 °С.

Экспериментальные данные по расходам воды и скорости вытягивания слитка были получены с помощью регулирующего микроконтроллера Ремиконт Р–112 п/с «охлаждение» с горячим резервированием [10, 11].

Тепловую работу кристаллизатора по передаче тепла от заготовки через многослойный кристаллизатор к охлаждающей жидкости можно описать математически. Используя математическую модель, можно описать процесс затвердевания слитка, а также распространение тепла по сечению заготовки и кристаллизатора [10]. В ряде случаев математическое моделирование тепловых процессов приводит к интегрированию нелинейного дифференциального уравнения нестационарной тепло-

проводности с граничными и начальными условиями. Приведенный метод определения температуры при нелинейных задачах теплопроводности показал высокую точность при отражении процесса нестационарной теплопроводности при радиационном теплообмене с окружающей средой, что свидетельствует об эффективности предложенного метода.

В настоящее время для конструкционных материалов, работающих в различных температурных условиях при различных значениях напряжений в поперечном сечении конструкции, появился дополнительный фактор, учитывающий накапливание повреждаемости в эксплуатируемом материале на основе теории континуальной повреждаемости Бейли – Нортон и Роботнова – Качанова [2, 3].

В НТУ «ХПИ» разработан программный комплекс SCC, который включает в себя: уравнения состояния ползучести при простом напряженном состоянии, принимая закон статической ползучести с повреждаемостью в виде уравнений Бейли – Нортон и Роботнова – Качанова. С помощью программного комплекса SCC параметр повреждаемости конструкционных материалов определяется в зависимости от температуры и напряжений в их поперечном сечении, а также от длительности воздействия данных напряжения.

Конечноэлементная формулировка задачи ползучести для тела вращения с учетом повреждаемости материала записывается в следующем виде:

$$[K]\{\dot{u}\} = \{\dot{F}\} + \{\dot{F}^c\},$$

$$\{\dot{F}\} = \sum_{N_\beta} \int_S [N]^T \{\dot{p}\} dS \Big|_{t=0} + \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [N]^T \{\dot{P}\} dV \Big|_{t=0},$$

$$\{\dot{F}^c\} = \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [B]^T \cdot [C] \cdot \{\dot{c}\} dV,$$

где  $K$  – матрица жесткости;  $u$  – глобальный вектор узловых перемещений;  $F$  – вектор узловых нагрузок, содержащий поверхностные и объемные силы;  $F^c$  – силы, обусловленные деформациями ползучести;  $B$  – матрица деформирования;  $C$  – матрица упругих констант;  $N$  – матрица форм;  $p$  и  $P$  – поверхностные и объемные нагрузки соответственно;  $c$  – необратимые деформации ползучести;  $\beta$  – номер конечного элемента;  $V_\beta$  – объем конечного элемента;  $\sum_{N_\beta}$  – суммирование по всем конечным элементам;  $S$  – площадь поверхности конечного элемента, нагруженного распределенными нагрузками.

Для задач ползучести и связанного с ней накопления повреждаемости в тонких оболочках конечноэлементная формулировка определяется следующей системой уравнений [10]:

$$[K]\{u\} = \{F\} + \{F^c\} + \{F^n\},$$

$$\{F\} = \sum_{N_\beta} \int_S [N]^T \{p\} dS, \{F^c\} = \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [B]^T \cdot [C] \cdot \{c\} dV,$$

$$\{F^n\} = \sum_{N_\beta} \left( \int_S [N]^T \{p^n\} ds + \int_{V_\beta} [B]^T [C] \{\varepsilon^n\} dV \right).$$

В литературных источниках отсутствуют сведения о математических моделях, которые позволяют определить повреждаемость вязкого участка непрерывно-литой заготовки (в частности заготовок из медных сплавов). Поэтому необходимо использовать методику определения коэффициентов к уравнениям Бейли – Нортон и Роботнова – Качанова на основе экспериментальных данных о высокотемпературной ползучести и разрушении образцов в температурном интервале 0.90 - 0.95 от ТЛ.

Параметр повреждаемости необходимо рассчитывать с помощью программного комплекса SCC, разработанного на кафедре «Системы и процессы управления» НТУ «ХПИ», на базе методов континуальной механики повреждаемости и теории ползучести. Расчеты необходимо проводить на основе метода конечных элементов и разностных методов интегрирования.

Для описания процессов ползучести и связанной с ней повреждаемости применим методику асимптотических разложений и усреднения в каждом цикле движения заготовки, предложенную в работе [12].

Усовершенствование конструкции устройства АИМА 5-2 с целью определения ползучести медных сплавов в температурном интервале  $(0,90...0,95)T_L$  позволит получить экспериментальные данные об увеличении при данных температурах испытания скорости ползучести в десятки тысяч раз.

Для изучения ползучести при высоких температурах была усовершенствована испытательная машина АИМА -5-2 [13]. Конструкция устройства защищена патентом [14, 15], а схема представлена на рис. 1.

Для испытания образцов в ось приложения нагрузки было добавлено устройство, состоящее из опоры 10, в котором находясь вертикальное 11 и горизонтальное 12 отверстия для установки штырей 13 и 14. Блок сравнения температур 15 подает сигнал на катушку индуктивности 16 и приводит в движение магниточувствительный стержень 17 [15 – 17].

Методика проведения испытаний на машине АИМА 5-2 к м. (подготовка)

1. Из непрерывно-литой заготовки изготавливаются стандартные образцы длиной 200 мм с базой 100 мм и диаметром 10 мм, что соответствует ГОСТ 26007-83 [18].

2. На образец 6 устанавливают экстензометр с индикатором деформации 21.

3. Верхний торец образца 6 с системой измерения деформации 21 вводят в резьбовое соединение с верхней тягой 7.

4. К нижней головке образца 6 крепят тягу прямого нагружения 8, на которой установлен груз 9 заданной массы.

5. На тарелку 18 компенсатора термических напряжений устанавливают опору 10 с вертикальным 11 и горизонтальным 12 отверстиями. В отверстия вставляют соответственно штыри 13 и 14. Тарелку компенсатора 18 устанавливают таким образом, чтобы штырь 14 касался нижней части тяги прямого нагружения 8. Таким образом, компенсатор напряжений (не показан) при нагревании образца будет регулировать вертикальное положение тарелки 18 по мере удлинения образца 6.

6. Производят опускание цилиндрического теплозащитного нагревателя 1 так, чтобы нагреватели 2 и 3 оказались на уровне верхней и нижней границ базы образца 6.

7. На индикаторе 21 стрелку показания деформации устанавливают в нулевое положение, после чего устройство готово к работе.

Испытания проводятся следующим образом.

1. Нагрев образцов до температуры испытания  $925 - 945^\circ\text{C}$  производится в три этапа [17].

2. Образец нагревали со скоростью  $10^\circ\text{C}/\text{c}$  до температуры  $700^\circ\text{C}$ ;

3. Нагрев образцов вели со скоростью  $3,3^\circ\text{C}/\text{c}$  до температуры  $875 \dots 900^\circ\text{C}$ , что составляет  $0,95\%$  температуры испытания.

4. Последующий нагрев образцов осуществляли со скоростью  $1,0^\circ\text{C}/\text{c}$ . Снижение скорости нагрева образца способствует выравниванию температуры по всему объему образца.

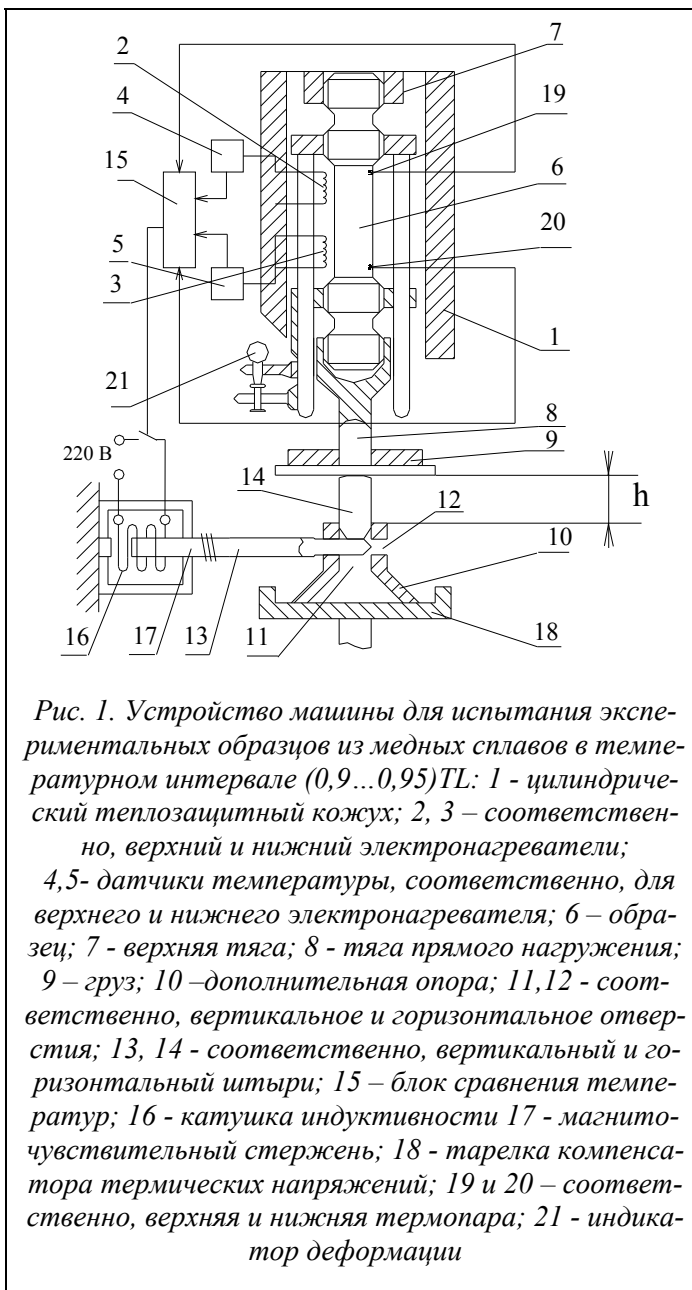


Рис. 1. Устройство машины для испытания экспериментальных образцов из медных сплавов в температурном интервале  $(0,9...0,95)T_L$ : 1 - цилиндрический теплозащитный кожух; 2, 3 - соответственно, верхний и нижний электронагреватели; 4,5- датчики температуры, соответственно, для верхнего и нижнего электронагревателя; 6 - образец; 7 - верхняя тяга; 8 - тяга прямого нагружения; 9 - груз; 10 - дополнительная опора; 11,12 - соответственно, вертикальное и горизонтальное отверстия; 13, 14 - соответственно, вертикальный и горизонтальный штыри; 15 - блок сравнения температур; 16 - катушка индуктивности 17 - магниточувствительный стержень; 18 - тарелка компенсатора термических напряжений; 19 и 20 - соответственно, верхняя и нижняя термопара; 21 - индикатор деформации

5. Начало испытания образцов определяет блок сравнения температур 15.

6. После этого на катушку 16 подается силовое напряжение 220 В, вследствие чего сердечник 17 втягивается в катушку 16 и горизонтальный штырь 13, соединенный с сердечником 17, освобождает отверстие 11.

7. Вертикальный штырь 14 соскальзывает по отверстию 11, в результате между тягой прямого нагружения 8 и опорой 10 образуется зазор величиной  $h$ . Зазор  $h$  позволяет реализовать скорость ползучести образца, находящегося в температурном интервале  $(0,9...0,95)T_L$ . Величина зазора  $h$  задается с 10-ратным запасом от величины деформации разрушения испытываемого образца.

8. Действие нагрузки на образец, находящийся в температурном интервале  $(0,9...0,95)T_L$ , вызывает его высокотемпературную ползучесть.

Таким образом, впервые для экспериментальных исследований разработана методика по определению ползучести в температурном интервале  $0,9...0,95$  температуры ликвидус образцов из медных сплавов. Для реализации методики произведено усовершенствование конструкции испытательной машины АИМА 5-2, что позволило испытывать образцы из медных сплавов со скоростью их свободной деформации.

### Выводы

Разработано нормативное обеспечение определения ползучести заготовки в виде методики проведения испытаний на усовершенствованной машине АИМА 5-2 и методики расчета параметра повреждаемости заготовок из медных сплавов с помощью уравнения Бейли-Нортон и Работнова-Качанова. Это дало возможность определять ползучесть при температуре вязкого участка заготовки из медных сплавов при увеличении скорости ползучести до 1650...2500 раз.

### Литература

1. Lemaitre, J. A course on damage mechanics [Text] / J. Lemaitre. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 228 p.
2. Работнов, Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
3. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения. [Текст] / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 311 с.
4. Стакян, М. Г. Вероятностная оценка сопротивления усталости гладких и ступенчатых валов [Текст] / М. Г. Стакян, К. Ц. Исаханян // Известия НАН РА ГИУА. Сер. Техн. науки. – 2004. – Т. LVII, №2. – С. 204-209
5. Федоров, В. В. Эргодинамическая концепция разрушения. Сообщение 3. Структура и критерии вязкого разрушения [Текст] / В. В. Федоров // Проблемы прочности. – 1991. – № 1. – С. 31 – 35.
6. Бреславский, Б. Д. Уравнение состояния циклической ползучести бронзовых сплавов [Текст] / Б. Д. Бреславский, О. А. Татарина, О. Н. Хорошилов // Вестник НТУ «ХПИ» Сборник научных трудов. Тематический выпуск. – 2007. – № 38 – С.36 – 41
7. Бреславский, Д. В. Высокотемпературная ползучесть и длительная прочность элементов конструкций при циклическом нагружении [Текст] / Д. В. Бреславский, О. К. Морачковский, О. А. Татарина // Проблемы прочности. – 2008. – № 5. – С. 45 – 53.
8. Ахундов, М. Прогнозирование усталостной прочности при циклическом нагружении / М. Ахундов, А. Сейфуллаев, А. Юзбашиева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, N 7(63). – С. 44-47. – Режим доступа : URL :<http://journals.uran.ua/ejet/article/view/14823>
9. Таран, Б. П. Прибор для автоматической записи усадочных явлений при кристаллизации чугунов [Текст] / Б. П. Таран, И. Н. Деньгин, Н. А. Томашкевич и др. // Вестник ХПИ. Лит. пр-во. – 1970. – Вып. 3, X-в, №47, (95). – С. 15-20.
10. Демиденко, Л. Л. Математическое моделирование охлаждения непрерывно-литого слитка с использованием зоны теплоизоляции [Текст] / Л. Л. Демиденко, Ю. А. Демиденко // Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Известия Челябинского научного центра. г. Челябинск. – 2002. – Вып.1 (14). – С 36–39
11. Демиденко, Л. Л. Результаты математического моделирования охлаждения непрерывно-литого слитка с использованием зоны теплоизоляции [Текст] / Л. Л. Демиденко, Ю. А. Демиденко // Известия Челябинского научного центра. г. Челябинск. – 2002. – Вып.2 (15). – С 44 – 46
12. Бреславский, Д. В. Метод асимптотических разложений в задачах мало - и многоциклового ползучести материалов [Текст] / Д. В. Бреславский, О. К. Морачковский, О. А. Уварова // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – №19. – С. 23 – 32
13. Машина для испытания металлов и сплавов на ползучесть и длительную прочность модели АИМА-5-2. Техническое описание и инструкция для эксплуатации. [Текст] / 2.773.053. ТО. – Иваново, 1977. - 150 с.
14. Патент на корисну модель України № 17741 МПК (2006) G 01 N 3/18. Пристрій для випробування зразків у температурному інтервалі кристалізації на повзучість та довготривалу міцність [Текст] / Хорошилов О. М., По

номаренко О. І., Шатагин О. О.; заявник та патентообладатель Націон. Технічний університет «Харківський політехнічний інститут».- № u200603571; заявлено 03.04.06. Опубл. 16.10.2006. Бюл. № 10. – 3 с.

15. Хорошилов, О. Н. Прочность медных сплавов в температурном интервале кристаллизации [Текст] / О. Н. Хорошилов // Лит. пр-во. – М.: – 1999. – № 12.– С. 22 - 23.

16. Патент на корисну модель України № 15924, МПК (2006) G 01 N 3/18. Спосіб випробування зразків у температурному інтервалі кристалізації на повзучість та довготривалу міцність [Текст] / Хорошилов О. М., Пономаренко О. І., Шатагин О. О.; заявник та власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».- № u200601204; заявлено 07.02.06. Опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7. – 6 с.

17. Хорошилов, О. Н. Методика определения высокотемпературной ползучести при испытании образцов из медных сплавов [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Процессы литья. – 2007. – № 1-2. – С. 23-26.

Поступила в редакцию 21.11.13

С. В. Романов, канд. техн. наук  
А. Н. Лагода

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина  
e-mail: [svrom@rambler.ru](mailto:svrom@rambler.ru)

УДК 621.757

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЯ

**Ключові слова:** розбирання з'єднань, індукційний нагрів, нестационарний тепловий процес, математична модель

**Анотація.** Розроблена математична модель нестационарного теплового процесу, яка є системою диференціальних рівнянь другого порядку змінної структури залежно від температури елементів багатокомпонентних з'єднань. Модель може бути використана як для керування нагріванням в процесах виплавки наповнювачів, так і для керування нагріванням при тепловому розбиранні з'єднань з натягом.

### Введение

Технологические системы (ТС) механосборочного производства, использующие термовоздействие при реализации процессов разборки или выплавки наполнителей, отличается от других ТС нестационарность, поскольку наряду с вещественными преобразованиями в них происходят периодические тепловые изменения элементов. Среди множества решенных задач теплопроводности и теплопередачи задачи, связанные с нестационарными процессами, наименее разработаны. Имеющиеся аналитические модели нагрева достаточно громоздки и малоуниверсальны. Для любой из вновь разработанных моделей требуется своя специализированная программа расчета.

### Постановка проблемы

Для обеспечения минимума энергопотребления и максимальной эффективности работы системы термовоздействие должно быть скоростным и адресным, т.е. за минимально короткий промежуток времени необходимо нагреть только те участки охватываемой детали соединения, расширение которых обеспечит требуемый для разборки тепловой зазор или участок корпуса, в котором содержится легкоплавкий наполнитель, подлежащий выплавке [1].

Электронагрев деталей, по сравнению с другими видами нагрева, более производителен и прост в управлении. Он исключает пережог металла и образование окалины. В механосборочном и ремонтном производствах при разборке соединений с натягом, а также для выплавки наполнителей используется индукционный нагрев. Простота исполнения нагревателя и хорошая управляемость процессом, особенно если использовать ток промышленной частоты, являются его достоинствами.

### Анализ исследований и публикаций

Достоинства индукционного нагрева являются причиной достаточно широкого распространения в ремонтном производстве технологий разборки на основе термовоздействия. Общепринятые названия этого способа – индукционно-тепловой способ (метод) разборки [2]. Он применяется в судоремонте, ремонте локомотивов, подвижного состава рельсового транспорта, дорожных машин, обогатительного и прессового оборудования и других видов техники. Хорошо зарекомендовал себя

© С. В. Романов, А. Н. Лагода, 2013