

Toigonbaev S. K., Evgrafov V. A. The use of electric arc heating and centrifugal pouring in the repair of machine parts

Применение электродугового нагрева и центробежной заливки при ремонте деталей машин

Toigonbaev S. K.,

candidate of technical Sciencesph, professor of the Department of technical operation of technological machinery and equipment of environmental engineering, Russian state agrarian University-MTAA named after K. A. Timiryazev.

Evgrafov V. A.,

doctor of, professor Department of technical operation of technological machines and equipment of environmental engineering, Russian state agrarian University-MTAA them. K. A. Timiryazev.

Тойгамбаев С.К.,

к.т.н., профессор кафедры технической эксплуатации технологических машин и оборудования природообустройства, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

Евграфов В.А.,

д.т.н., профессор кафедры технической эксплуатации технологических машин и оборудования природообустройства, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

***Abstract.** The article presents the results of the study of electric arc parameters in the process of electric arc heating and centrifugal pouring when restoring the reliability of bronze sliding sleeves. Some calculations and nomograms of optimal regimes of the pouring process are proposed.*

***Keywords:** electric arc; sliding sleeve; reliability; bronze sleeve.*

***Аннотация.** В статье представлены результаты исследования параметров электрической дуги в процессе применения электродугового нагрева и центробежной заливки при восстановлении показателей надежности бронзовых втулок скольжения. Предложены некоторые расчеты и номограммы оптимальных режимов процесса заливки.*

***Ключевые слова:** электрическая дуга; втулка скольжения; надежность; бронзовая втулка.*

Целью данного исследования являлось изучение влияния параметров электрической дуги, температурного режима процесса, скорости, выбора состава и количества шихты на качество заливаемого бронзового слоя методом центробежной заливки с применением электродугового нагрева, при восстановлении работоспособности бронзовых втулок скольжения. Ставилась задача выявить основные параметры электрической дуги, влияющие на качество заливки. Анализ обработки номенклатуры деталей бронзовых подшипниковых втулок, применяемых в узлах и агрегатах автомобилей, тракторов, мелиоративных, строительных и сельскохозяйственных машинах и механизмах, показывает, что наиболее часто используются оловянистые бронзы Бр ОЦС5-5-5, Бр ОЦС 6-6-3, Бр ОЦС 4-4-2,5 и алюминиево-железистые бронзы Бр АЖ 9-4, ГОСТ 5017-74 и ГОСТ 613-79.

Исследования проводились при удельной мощности 0,24...0,34 кВт/см³, температуре нагрева 750 – 850° С и 650 – 730° С, скорости 3...6 м/с, величине длины дуги $\frac{L_d}{L_B} = 50 \dots 100\%$, времени нагрева 2...4 минут. Для проведения экспериментов приняты следующие исходные данные: марка втулки – Бр ОЦС 6-6-3; Бр Аж 9-4; размеры заготовки – внутренний диаметр 60 мм, наружный диаметр 65 мм, длина 42,5 мм; порошок из цветных сплавов; размер стружки 1...2 мм; флюс – прокаленная, технический чистая бура 2% от массы стружки; температура нагрева 650 – 850° С; скорость вращения 3-6 м/с.; режим охлаждения в ящике с песком до 200°С, далее на воздухе.

Порошок из цветных сплавов состоит: - композиционный порошковый сплав марки ПР-Х18Н9-50%; - хлористый цинк – 3%; - оксид алюминия – 25%;

- порошковый цинк – 22%. Химический состав композиционного порошкового сплава в ПР-Х18Н9%: - хром – 10...20%; - никель – 8...11%;

- углерод – не более 0,12%; - кремний – не более 0,8%;

- марганец – не более 1,0%; - железо – остальное.

Следует помнить, что бронза плавится при температуре 967...1040°C в зависимости от ее марки. Достаточной жидкотекучестью она обладает при температуре 1100...1200°C. Не следует перегревать бронзу выше 950°C, так как при этом возможен размыв самой заготовки-основы. Подготовка поверхности под заливку включала в себя механическую обработку для снятия рисков и нарушения геометрии отверстия в процессе эксплуатации (эллипсность, конусность) с чистотой поверхности $R_a = 10$ мкм. Необходимое количество массы бронзовой стружки составляет при толщине заливки 2 мм $P_c = 172,5$ г, а флюса $P_\phi = 3,5$ г. Шихта приготавливалась тщательным перемешиванием бронзовой стружки 1...2 мм и флюса, технически чистая бура, из расчета 2% от массы загружаемой стружки с последующим прессованием на прессе в специальном приспособлении [1].

По результатам экспериментов были построены “Номограммы по определению оптимальных технологических режимов процесса заливки” для подобранной номенклатуры бронзовых подшипниковых втулок. Во время технологического процесса расплавления бронзы, нагрев заготовки и шихты осуществлялись независимой сварочной дугой. Тепловая мощность дуги выбиралась, исходя из обеспечения быстрого и эффективного расплавления бронзы и нагрева заготовки, а также из благоприятных условий ведения процесса. Исходя из того, что лучистая энергия от электрической дуги поступает, прежде всего, к загруженной шихте, а толщина заливаемого бронзового слоя колеблется в пределах от 1 до 4 мм (в зависимости от величины износа). За определяющий фактор оптимальной удельной мощности принималась мощность на 1 см^3 заливаемого металла. При выполнении данного исследования изучались влияние удельной мощности дуги на продолжительность заливки, а также удельной мощности дуги и продолжительности заливки на выгорание компонентов бронзы. Исследование проводилось при различной удельной мощности с интервалом $0,1 \text{ кВт/см}^3$ и времени с интервалом 1 минута. Величину тока и напряжения в цепи замеряли с помощью амперметра и вольтметра типа Э-30 с классом точности 1,5 и ваттметра Д-142 с классом точности 2,5. Продолжительность заливки замеряли секундомером С-1-2а с точностью ± 1 с.

Во время процесса центробежной заливки с применением электродугового нагрева электрическая дуга своей тепловой энергией должна расплавить шихту до жидкотекучего состояния внутри вращающейся втулки и произвести прогрев самого тела восстанавливаемой бронзовой втулки. Выделяемая энергия электрической дуги между двумя неплавящимися электродами расходуется на увеличение теплосодержания бронзовой стружки и втулки, а так же на потери в окружающую среду. Поэтому уравнение теплового баланса можно представить в следующей форме:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

(1)

где: Q -теплота, выделяемая электрической дугой во время горения электродов, кДж; Q_1 - теплота, необходимая на тепловое содержание бронзовой стружки и втулки, кДж; Q_2 - теплота, идущая на потери в окружающую среду, кДж.

Для решения составленного уравнения теплового баланса по определению параметров основных факторов процесса заливки введем следующие условия: температура окружающей среды, воздуха (пространство под защитным кожухом) постоянна; температура заливаемого слоя бронзы по всей толщине и длине восстанавливаемой втулки одинакова и находится в жидкотекучем состоянии, потеря теплоты происходит через наружную поверхность восстанавливаемой втулки (потерей теплоты через торцы втулки можно пренебречь ввиду изоляции графитовыми вставками).

Количество теплоты, выделяемой электрической дугой за время горения неплавящихся электродов за времени dt можно определить из уравнения:

$$Q = \beta \cdot I \cdot U \cdot dt \quad (2)$$

где: β - тепловой баланс; I - сила тока, А; U - напряжение, В.

Количество теплоты, необходимое на теплосодержание бронзовой стружки и восстанавливаемой втулки, во время процесса заливки находится из уравнения:

$$Q = P \cdot C_{t_{ж}} \cdot dt_{ж} \quad (3)$$

где: P - общая масса бронзы, кг; $t_{ж}$ - температура в зоне соединения основного и заливаемого металла, °С; $C_{t_{ж}}$ - теплоемкость бронзы при температуре, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$. $P = P_1 + P_2$ (4)

где: P_1 - масса загружаемой бронзовой стружки, кг; P_2 - масса восстанавливаемой бронзовой втулки, кг.

Количество теплоты, идущее на потери в окружающую среду через наружную поверхность восстанавливаемой втулки за промежуток времени dt , определяется из уравнения: $Q_2 = \alpha_0 \cdot \pi \cdot d_H \cdot \ell \cdot (t_1 - t_0) \cdot dt$ (5)

где: α_0 - коэффициент теплообмена (теплоотдачи) конвекцией и лучеиспусканием через наружную поверхность восстанавливаемой втулки, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2}$;

d_H -наружный диаметр, м; ℓ -длина втулки, м; t_1 -температура наружной поверхности втулки, °С; t_0 -температура окружающей среды, °С.

Показательной величиной, зависящей от скорости и характеризующей центробежное поле сил, является гравитационный коэффициент K :

$$K = \frac{F}{\sigma} \quad (6)$$

где: F - центробежная сила, Н; σ - сила тяжести, Н.

Величина гравитационного коэффициента определяет скорость всплытия неметаллических включений в жидком металле. Для изготовления цельнообразных втулок малых и средних диаметров при центробежном литье гравитационный коэффициент равен 80...100.

В данном исследуемом методе для определения частоты вращения целесообразно воспользоваться формулой, в которой искомое число оборотов увязывается с внутренним диаметром втулки:

$$n = \sqrt{\frac{K \cdot 900 \cdot 2g}{\pi^2 \cdot d}} \quad (7)$$

где: n – частота вращения восстанавливаемой втулки, об/мин;

g – ускорение свободного падения, м/с²; d – внутренний диаметр, м.

Скорость втулки выражается уравнением:
$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (8)$$

После преобразования получим следующую зависимость:

$$V = 2,22 \cdot \sqrt{d \cdot K} \quad (9)$$

Результаты исследования позволили установить следующее (рис. 1 и 2): - при выборе максимальной удельной мощности дуги от 0,5 кВт/см³ и выше прогревание, нагрев и расплавление бронзы происходят в минимальный промежуток времени от 3 и менее минут, отсюда следует, что процесс слабо поддается контролю и регулированию; - цинк, олово и свинец выгорают менее активно, за 3-4 минуты технологического процесса цинка выгорает 1,8%, олова 1,5% и свинца 0,6% от общего их количества в составе бронзы; - при удельной мощности электрической дуги от 0,3 кВт/см³ и меньше качество заливаемого бронзового слоя получается удовлетворительным, если происходит полное прогревание, нагрев и расплавление основного и заливаемого металла.

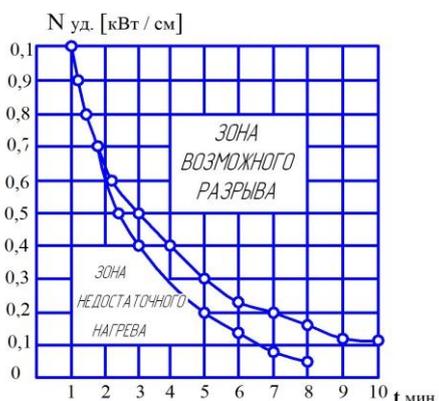


Рис.1 Влияние удельной мощности дуги на продолжительность заливки
 $T=1200\text{ C}$, $V = 4,5\text{ м/с}$, $L_{\text{д}} / L_{\text{в}}=75\%$

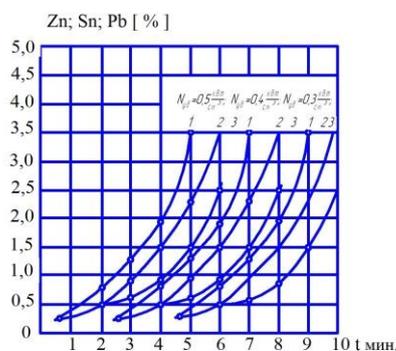


Рис. 2 Влияние удельной мощности дуги и продолжительности заливки на выгорание компонентов бронзы
 1-кривая выгорания цинка, 2-олова, 3-свинца
 $T = 1200\text{C}$, $V = 4,5\text{ м/с}$, $L_{\text{д}} / L_{\text{в}} = 75\%$

Однако, при очень малых мощностях $0,1 \text{ кВт/см}^3$ и менее длительность технологического процесса заливки увеличивается (свыше 10 минут), что приводит к снижению производительности. Оптимальными удельными мощностями электрической дуги следует считать такие мощности, которые обеспечивают достаточный температурный режим и производительность за время горения электрической дуги, высокое качество заливки и незначительное выгорание компонентов бронзы (до 1,0% от их количества в бронзе).

Исходя, из проведенного исследования можно считать, что числовое значение оптимальной удельной мощности находится в пределах $0,2...0,3 \text{ кВт/см}^3$. В дальнейшем при проведении всех исследований величину удельной мощности принимали равной $0,3 \text{ кВт/см}^3$. В экспериментах в качестве источников питания дуги использовались сварочные трансформаторы ТД - 500. В сварочных трансформаторах напряжение холостого хода постоянно, поэтому регулирование мощности электрической дуги осуществлялось за счёт изменения тока. Напряжение холостого хода, являясь величиной постоянной, также определяет тепловую мощность дуги, а значит и интенсивность процесса заливки. Кроме того, чем больше напряжение холостого хода, тем длиннее дуга. Поэтому длина дуги имеет определяющее значение на качественное проведение технологического процесса восстановления работоспособности бронзовых подшипниковых втулок [1]. Номограммы определения оптимальных технологических режимов процесса заливки, построены на основании данных, полученных вышеприведенным исследованием (рис3). Проведённый анализ геометрических размеров бронзовых подшипниковых втулок, подлежащих восстановлению по предлагаемой номенклатуре, выявил, что наиболее чаще встречаются втулки с диаметром и длиной в пределах 50...80 мм. Поэтому при создании номограмм исходили из этих величин. В основу построения графиков по выбору массы заряда бронзовой стружки были положены условия анализа размеров втулки и толщина заливаемого слоя 1...3 мм, куда входят величина износа и припуск на механическую обработку для данной гаммы втулок. Для удобного вычисления промежуточных значений величин методом интерполяции графики строились с интервалом 10 мм. При построении графика выбора длины L_D от длины втулки L_B исходили из составляющей отношение $\frac{L_D}{L_B} = 75\%$. Для предлагаемых длин втулок длина дуги составляет 30...60 мм. При такой длине дуги напряжение будет колебаться в пределах 70...100В. Для обеспечения таких параметров длины и напряжения дуги достаточно двух сварочных трансформаторов ТД-500 с общим напряжением холостого хода $U_{XX} = 150 \text{ В}$.

График выбора массы флюса строили из расчёта 2% от массы заряда бронзовой стружки. При определении частоты вращения восстанавливаемой втулки от внутреннего диаметра построение графика велось при $V = 4,5 \text{ м/с}$. Чтобы правильно произвести выбор диаметра угольного или графитового электрода для технологического процесса были

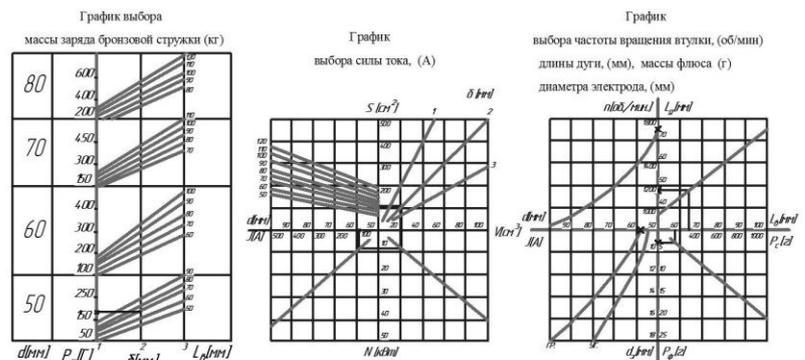


Рис. 3 Номограммы определения оптимальных технологических режимов процесса заливки

построены графики, где учитывались их стойкость и плотность тока (для угольных – $1,2 \text{ А/мм}^2$ и графитовых – 2 А/мм^2). Для определения параметров тока при напряжении 85В. строились дополнительные графики, которые позволили определить: - площадь заливаемой поверхности; - объём заливаемого металла; - мощность дуги, необходимой для процесса заливки. Величина напряжения 85В выбрана, исходя из размеров втулки. Предлагаемые номограммы позволяют быстро и точно определить все необходимые режимы и условия заливки. Достаточно знать толщину заливки, внутренний диаметр и длину бронзовой втулки.

Для исследования, изменения твердости от толщины заливаемого слоя, были использованы восстановленные по оптимальным технологическим режимам бронзовые подшипниковые втулки Бр ОЦС 6-6-3 с толщиной залитого слоя до 4 мм (рис. 4). Твердость определялась на приборе ТП с интервалом 0,5 мм. Каждый слой испытывали в трёх точках и каждый отпечаток измеряли по двум диагоналям, а твердость считалась по среднему значению диагонали. Составлен график влияния изменения твердости залитого бронзового слоя в зависимости

от толщины. Твердость от толщины слоя уменьшается от границы стыка основ-ной и заливаемой бронзы к центру. Причём твердость залитого слоя бронзы выше твердости исходного материала. Таким образом, повышенная твердость у границы соединения объясняется уменьшением зерна, уплотнением кристаллизующейся бронзы под действием центробежных сил и за счёт незначительного изменения послойного химического состава бронзы [2, 3].

Изучалось так же и износостойкость залитого бронзового слоя при работе в условиях смазки без абразива и с содержанием в смазке абразива (Рис. 5). В качестве смазки использовали масло ДСп-11. Испытание велось при постоянной скорости 1м/с, продолжительности 40 часов. Приработку пар трения производили при ступенчатом нагружении с нагрузками от 2 до 10 МПа с интервалом 1 МПа. Процесс работы контролировали по моменту трения, температуре образца и масла. Момент трения регистрировали на диаграммной бумаге самописца машины трения СМЦ-2. Окончание приработки определяли по стабилизации момента трения. При испытании смазки с абразивом в качестве абразива применяли кварцевую пыль зернистостью 20...25 мкм. (ГОСТ8002-62).

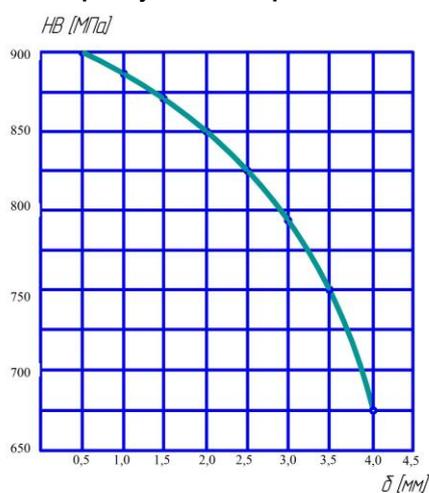


Рис. 4 График изменения твердости залитого бронзового слоя в зависимости от толщины

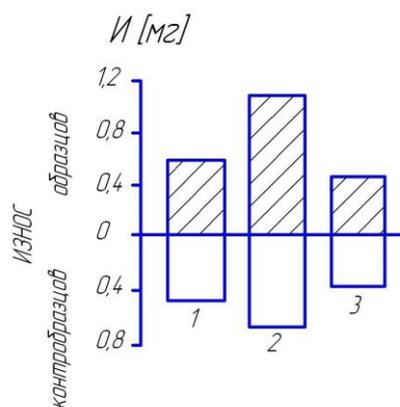


Рис. 5 Износ бронзы при работе в паре с закаленной сталью 45 (смазка с абразивом 10 %) 1- литая, 2- переплавленная, 3- залитая

Давление при абразивном изнашивании было постоянным 3 МПа. Время питания 1 час. Содержание абразива в масле было принято равным 0,1%. Пористость залитого антифрикционного слоя,

подвергаемого испытаниям, составила 3...5%. В процессе исследований было изучено изменение коэффициента трения образцов бронзы, изготовленных из литой, переплавленной и залитой исследуемым методом бронзы при работе с закаленной сталью при различных давлениях [4]. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние давления на коэффициент трения пары бронзы – закалённая сталь 45

Давление МПа	Бронза Бр ОЦС 6-6-3		
	литая	переплавленная	залитая
1,0	0,058	0,080	0,039
2,0	0,058	0,083	0,040
3,0	0,059	0,088	0,041
4,0	0,060	0,094	0,043
5,0	0,065	0,102	0,046
6,0	0,072	0,114	0,048
7,0	0,080	0,118	0,051
8,0	0,090	0,122	0,054
9,0	0,100	0,130	0,060
10,0	0,110	0,142	0,068

Износ образца восстановленной исследуемым методом на 20% меньше износа литой бронзы и 2...2,5 раза меньше износа образца, изготовленного из переплавленной бронзы. При этом контробразцы, работающие в паре с восстановленными образцами имеют износ на 10...15% меньше износа контробразцов,

работающих, соответственно в паре из литой бронзы и в 1,5 раза из переплавленной. Исследование показало, что увеличение износостойкости залитого бронзового слоя можно объяснить улучшением физико-механических свойств этого слоя в процессе заливки. Залитый бронзовый слой становится более стойким к воздействию абразивных частиц. Наличие пор в незначительной мере влияют на износ контробразцов. Образцы с пористостью до 3...5% хорошо работают как при постоянной подаче масла, так и при недостатке или временном прекращении смазки. Поры аккумулируют смазку, которая в аварийном случае выходит на поверхность трения, предохраняя тем самым металлическое касание вала со втулкой [2,3].

Выводы:

Применение электродугового нагрева с центробежной заливкой при восстановлении надежности бронзовых втулок, позволяет нанесение антифрикционного слоя из бронзы толщиной до 4 мм, является производительным, универсальным и эффективным. Проведенные исследования показали актуальность данного метода восстановления бронзовых втулок. По показателям износостойкости и работоспособности восстановленная втулка на 15 – 20 % превосходит аналогичные показатели новой литой бронзовой втулки. Физико-механические свойства залитого слоя в процессе заливки становится более стойким к воздействию абразивных частиц.

References

1. Тойгамбаев С.К. Применение термодиффузионных процессов для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной техники. Монография, М., Ред. Издат. Отдел ФГОУ ВПО МГУП, 2011, 154 с.

2. Технология металлов и сварка. Учебник для вузов. Под редакцией П.И. Полушина, М., Высшая школа, 1977, 464 с.
3. Тойгамбаев С.К., Шнырев А.П., Голиницкий П.В. Метрология. Стандартизация. Сертификация. Учебник для ВУЗов. М.: Изд. Спутник+, 2017–375с.
4. Тойгамбаев С.К., Голиницкий П.В. Измерение и контроль деталей транспортных и транспортно-технологических комплексов. Учебное пособие. М.: Изд. Спутник +, 2018. – 153с.
5. В.И. Ануриев. Справочник конструктора – машиностроителя. Том 1. М., Машиностроение, 1979, 730 с.
6. Голиницкий П. В., Вергазова Ю. Г., Антонова У. Ю. Разработка процедуры управления внутренней документацией для промышленного предприятия//Компетентность. 2018. № 7 (158). С. 20-25.
7. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. Расчет затрат на контроль технологических процессов ремонтного производства // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2004. № 5. С. 75-77.
8. Тойгамбаев С.К., Голиницкий П.В. Размерный анализ бронзовых подшипников скольжения при обжати//Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2013. № 2. С. 58-60.
9. Тойгамбаев С.К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственных и мелиоративных машин при применении процесса термоциклической диффузионной металлизации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / МГУП им. Н.А. Костякова. Москва, 2000г.
10. Тойгамбаев С.К., Голиницкий П.В. Размерный анализ подшипников скольжения при обжати. Вестник МГАУ им. В,П. Горячкина. 2013. № 2 (58). С. 38-40.