

УДК 536.221; 532.542

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЖИДКОГО СВИНЦА НА ГРАНИЦУ КОНТАКТА СО СТАЛЬЮ 12Х18Н10Т И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ЭТОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

С. Ю. Хрипченко, В. М. Долгих

Проведены эксперименты по определению контактного электросопротивления границы раздела нержавеющей стали 12Х18Н10Т с жидким свинцом. Описывается экспериментальная установка методики проведения эксперимента. Показано, что после продолжительного воздействия (322 часа) на исследуемые стальные пластины жидким свинцом с протекающим по нему электрическим током, контактное сопротивление уменьшилось от $(3,49 \pm 0,38)10^{-8}$ до $(2,75 \pm 0,25)10^{-8}$ Ом·м², и после дальнейшего продолжительного воздействия (530 часов) это сопротивление изменялось слабо. При облуживании поверхности образца оловом контактное сопротивление почти на порядок уменьшилось – до $(0,41 \pm 0,17)10^{-8}$ Ом·м². В работе описывается эксперимент, и приводятся его результаты по исследованию разрушающего воздействия на пластины из нержавеющей стали жидкого свинца при протекании через свинец и пластины электрического тока. Экспериментально показано, что даже после 530-ти часов воздействия жидкого свинца с электрическим током на исследуемые стальные пластины значительных разрушений поверхности не наблюдалось.

Ключевые слова: электросопротивление границы, эксперимент, жидкий свинец, нержавеющая сталь, разрушение поверхности.

Введение

В коммутационных устройствах, магнитогидродинамических насосах (МГД-насос), униполярных генераторах, скользящих электрических контактах [1 – 5] сильный электрический ток протекает через границу жидкий металл – твердый металл. На этой границе возникает дополнительная разность потенциалов, обусловленная наличием электросопротивления тончайшего поверхностного слоя из окислов и интерметаллидов, присутствующих на поверхности твердого металла, контактирующего с другим жидким металлом [4]. Электрическое сопротивление этого слоя (тонкой пленки) приводит к дополнительной потере электрической мощности в этих устройствах. Особенно вредно сказывается действие такой пленки, находящейся на внутренней поверхности стенок канала кондукционных насосов, что приводит к увеличению шунтирования стенками канала жидкого металла, а это снижает силу тока в нем и тем самым уменьшает развиваемое насосом давление. Таким образом, определение величины поверхностного сопротивления на границе твердого и жидкого металлов и возможность снижения его сопротивления задача весьма актуальная.

В работах [1 – 4] описываются исследования сопротивления поверхностной пленки на границе меди, стали, нержавеющей стали, никеля, хрома с жидким галлием и его различными эвтектическими сплавами.

Проведенные исследования [1] показали, что контактное сопротивление между этими металлами и галлием, а также его сплавами лежит в широком диапазоне от $(0,116 \pm 0,008) 10^{-10}$ (у меди) до $(59,1 \pm 8,9)10^{-10}$ Ом·м² (у нержавеющей стали).

Проведение предварительной подготовки твердой контактирующей поверхности под слоем жидкого металла (механическая зачистка) позволяло уменьшить переходное сопротивление на 67%. Повышение температуры увеличивало сопротивление до 16%. С течением времени сопротивление уменьшалось на 40% [1].

В связи с созданием атомных реакторов, в которых в качестве теплоносителя используется жидкий свинец [6], является актуальным создание МГД-насосов, перекачивающих этот металл. Традиционно применяемые в атомной промышленности насосы бегущего поля для перекачивания жидкого натрия при использовании их для перекачивания жидкого свинца будут иметь очень большие габариты и вес, связано это с высоким удельным электросопротивлением и плотностью свинца в отличие от натрия. В случаях, когда требуется создание высоких давлений при относительно невысоких расходах для перекачивания жидкого свинца, могут успешно быть применены кондукционные насосы, обладающие в сравнении с насосами бегущего поля относительно небольшими размерами, но способные создавать достаточно высокое давление [7 – 9].

В кондукционных МГД-насосах электрический ток обычно подводится к жидкому свинцу через стенки канала, изготовленные (во многих случаях) из нержавеющей стали. Для разработки и создания таких насосов необходимо учитывать влияние электросопротивления контактной пленки на их работу, кроме того, жидкий свинец может выщелачивать никель и титан из состава нержавеющей сталей, из которых изготавливаются стенки канала

насосов. Как показали исследования [10 – 12], жидкий свинец при температуре до 500°C даже после 1200 часов контакта со стенками образца из нержавеющей стали лишь незначительно (на несколько микрон) разрушил их поверхность. Однако в кондукционных МГД-насосах стенки канала не просто контактируют с расплавом свинца, через них в свинец протекает электрический ток плотностью 1 А/мм^2 и более, и при этом металл перекачивается и омывает стенки канала. Поэтому представляется интересным поведение нержавеющей стали в контакте с жидким свинцом при протекании через границу контакта электрического тока. В своей работе мы экспериментально определяли удельную электрическую проводимость пленки на границе стали с расплавом свинца, а также воздействие жидкого свинца на нержавеющую сталь 12X18H10T при протекании через границу контакта электрического тока. К сожалению, по условию эксперимента скорость движения металла, омывающего поверхность испытуемого образца, была значительно меньше тех скоростей, которые имеют место в реальных насосах.

Экспериментальные установки

Первая установка была предназначена для определения контактного электросопротивления нержавеющей стали – жидкий свинец. Она состояла из керамической кюветы, имеющей полость для жидкого металла прямоугольной формы *1* длиной в $119 \pm 0,25 \text{ мм}$, шириной $19,5 \pm 0,25 \text{ мм}$ и глубиной

$45,5 \pm 0,25 \text{ мм}$ (рис. 1, *а*). У противоположных торцевых стенок располагались медные токовые электроды *2*. В кювету наливался слой жидкого свинца *3* толщиной $16 \pm 0,25 \text{ мм}$. В жидкий металл на расстоянии друг от друга в 82 мм опускались два электрода *4* для измерения разности потенциалов. Между потенциальными электродами вставлялись испытываемые образцы (пластины *5* толщиной 1 мм из нержавеющей стали 12X18H10T), погружавшиеся в свинец и перегораживающие поперечное сечение кюветы. Кювета устанавливалась на электронагреватель *б* (см. рис. 1, *а*), который мог плавить в ней свинец и менять температуру расплава. Температура жидкого свинца контролировалась прибором ООО НПП «Дана Терм» (термометр цифровой малогабаритный – ТЦМ 1511) с диапазоном измерений $-50 - +1000^{\circ}\text{C}$ (точность измерений $\pm 1^{\circ}\text{C}$).

В эксперименте измерялось электрическое сопротивление металла в кювете при различном количестве исследуемых пластин, погруженных в него и перегораживающих кювету поперек.

Измерение электрического сопротивления проводилось по четырехточечной схеме. При этом к металлу в кювете отдельными двумя токовыми электродами *2* (см. рис. 1, *а*) подводился фиксированный по силе электрический ток от источника постоянного тока (АКТАКОМ АТН-2232 DC Power supply), а разность потенциалов измерялась с помощью двух потенциальных электродов *4* цифровым мультиметром (APPA 305).

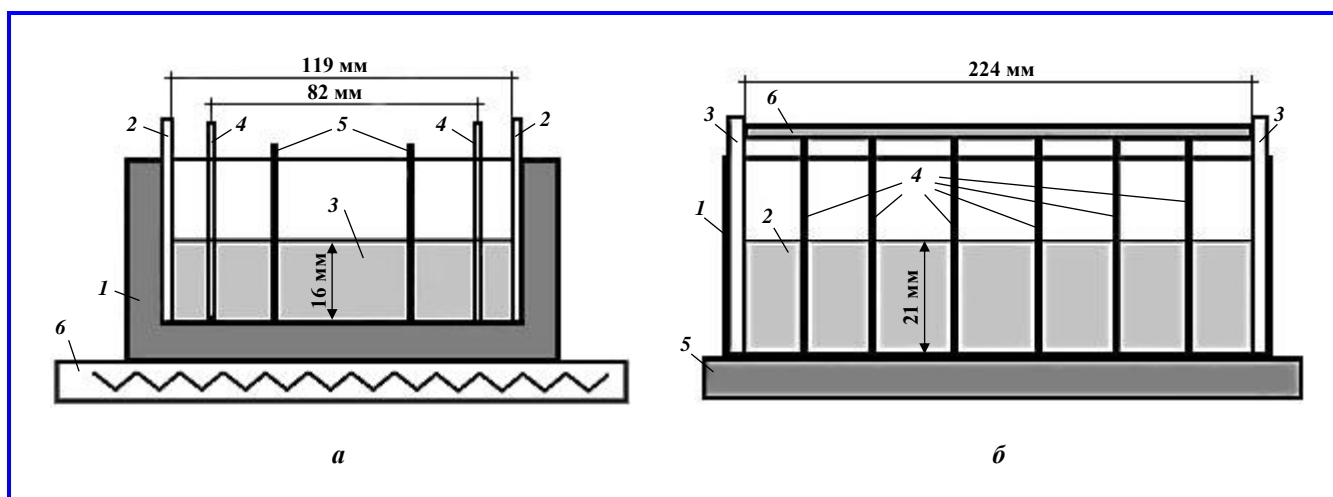


Рис. 1. Кюветы с жидким свинцом и исследуемыми образцами: *а* – керамическая кювета для измерения контактного электросопротивления стали 12X18H10T с жидким свинцом: *1* – корпус кюветы; *2* – токовые электроды; *3* – жидкий свинец; *4* – потенциальные электроды; *5* – пластины из стали 12X18H10T (образцы); *б* – электронагреватель; *б* – кювета из нержавеющей стали для изучения воздействия жидкого свинца на нержавеющую сталь 12X18H10T: *1* – корпус кюветы; *2* – жидкий свинец; *3* – токовые электроды; *4* – исследуемые образцы; *5* – муллитовая пластина; *б* – муллитовая крышка

С помощью второй установки определялось разрушающее воздействие расплавленного свинца на нержавеющую сталь 12X18H10T при протекании электрического тока. Эта установка состояла из кюветы 1 (рис. 1, б) прямоугольного поперечного сечения, изготовленной из листа нержавеющей стали толщиной 1 мм. Длина ее по внешним стенкам составляла $224 \pm 0,25$ мм, ширина $32 \pm 0,25$ мм, высота $51 \pm 0,25$ мм. Кювета заполнялась свинцом 2 на глубину $21 \pm 0,25$ мм.

На противоположных торцевых стенках были закреплены медные токовые электроды 3, а между ними, погруженные в жидкий металл, располагались шесть пластин 4 (образцы) из нержавеющей стали 12X18H10T толщиной 1 мм.

Кювета устанавливалась на муллитовую пластину 5, а сверху прикрывалась такой же пластиной 6 из муллитового картона. Через кювету со свинцом и пластинами (образцами) посредством медных электродов пропусклся постоянный электрический ток от источника постоянного тока Heiden (Heiden electronics GmbH Wiesengrund 1 D-86932 PURGEN/Germany) силой 750 и 870 А. Этот электрический ток расплавлял свинец и поддерживал его в жидком состоянии при постоянной температуре.

Эксперимент по измерению электросопротивления границы жидкий свинец – нержавеющая сталь и его результаты

Эксперимент по определению контактного электросопротивления жидкий свинец – нержавеющая сталь проводился следующим образом.

Кювета располагалась на электронагревателе 6 (см. рис. 1, а) и разогревалась до температуры плавления свинца, после чего в нее вливался жидкий свинец. Затем через жидкий свинец в кювете пропусклся фиксированный постоянный электрический ток силой в 20 А. После установления стационарного режима производилось измерение разности потенциалов на потенциальных электродах в кювете. После проведенного измерения в кювету вставлялась пластина из стали 12X18H10T (испытуемый образец), перегораживающая сечение кюветы, и снова проводилось измерение разности потенциалов. Затем в кювету вставлялась вторая пластина, и измерения повторялись. После проведения этой серии измерений пластины вынимались, и эксперимент повторялся. Всего было проделано три серии измерений.

Были проведены эксперименты с пластинами из нержавеющей стали с обычной необработанной поверхностью, с пластинами, подвергнутыми в течение 322-х и 530-ти часов воздействию жидкого свинца и электрического тока, а также с пла-

стинами, не подвергавшимися прежде воздействию жидкого свинца, но поверхность которых была облужена оловом. В эксперименте пластины из нержавеющей стали погружались в жидкий свинец, через который протекал постоянный электрический ток силой 750 А (322 часов) и затем 870 А (еще 208 часов).

Лужение пластин осуществлялось следующим образом. Поверхность протравливалась в растворе соляной кислоты и лудилась жидким галлиевым сплавом (87,5% Ga, 10,5% Sn, 2% Zn [13]), после чего производилось лужение оловом в ванне с его расплавом.

При проведении экспериментов результаты измерений приводились к результату измерения с одной пластиной. После этого находились разности значений электросопротивления кюветы без пластин и с пластинами, затем по полученным данным находилось среднее значение этой разности. По собранным в результате измерений двенадцати значениям контактного сопротивления пленки вычислялось удельное электросопротивление путём умножения ее электросопротивления на площадь погруженной части пластины. С доверительной вероятностью в 95% вычислялась также погрешность полученной величины.

В этом эксперименте постоянный электрический ток, протекая по жидкому свинцу, проходил через погруженные в него стальные пластины-образцы. Электрическую эквивалентную схему такого процесса можно представить в виде последовательного соединения электросопротивления контактных пленок r на границе пластин (образцов) N и жидкого свинца с электросопротивлением погруженных в свинец пластин R_{Pl} и электросопротивления свинца в кювете R^*_{Pb} (рис. 2). При этом $R^*_{Pb} = R_{Pb} - Nr_{Pb}$, R_{Pb} – электросопротивление свинца в кювете без перегородок; r_{Pb} – электросопротивление слоя свинца толщиной в одну испытываемую пластину.

Таким образом, искомое электросопротивление пленки r на границе будет определяться выражением:

$$r = (R - R_0)/2N - R_{Pl}/2 + r_{Pb}/2; \rho = rS, \quad (1)$$

где R_N – электросопротивление кюветы со свинцом и с N -м количеством пластин; R_0 – электросопротивление

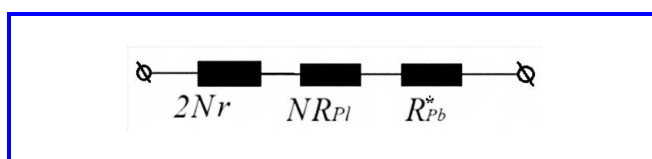


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема кюветы из керамики, заполненная жидким свинцом, в который погружены исследуемые образцы

кюветы со свинцом без пластин; ρ – удельное контактное электросопротивление сталь 12X18H10T – жидкий свинец; S – площадь смоченной свинцом части пластины. Результаты приведены в табл. 1.

Как видно из результатов эксперимента удельное электрическое контактное сопротивление между нержавеющей сталью и свинцом почти на порядок снижается при облуживании контактной поверхности нержавеющей стали оловом.

Можно также видеть, что при обработке нержавеющей стали жидким свинцом при протекании по нему электрического тока удельное контактное электросопротивление с течением времени несколько снижается (рис. 3).

Эксперимент по разрушающему воздействию жидкого свинца на нержавеющую сталь 12X18H10T при протекании через границу контакта электрического тока

В этих экспериментах использовалась кювета, выполненная из нержавеющей стали (см. рис. 1, б).

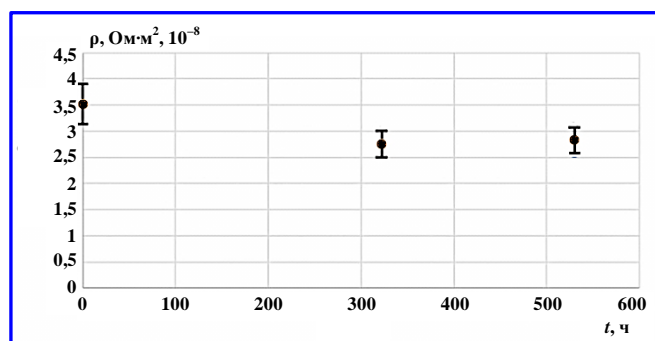


Рис. 3. Удельное контактное сопротивление на границе сталь 12X18H9T – жидкий свинец в зависимости от времени контакта стали со свинцом при протекании по нему постоянного электрического тока

В кювету наливался жидкий свинец на глубину 21 мм, и погружались шесть пластин из нержавеющей стали (12X18H10T) 5 (см. рис. 1, б). Пластины располагались вдоль кюветы на равном расстоянии друг от друга. Через жидкий свинец и пластины в кювете при помощи электродов 3 пропускаться электрический ток силой в 750 А. Ток разогревал металл, который после расплавления достигал температуры 480 ± 5 °С, после чего в таком состоянии кювета выдерживалась 7 часов, а затем ток выключался и металл застывал. В последующие дни процедура повторялась. Общая продолжительность эксперимента (воздействия жидкого свинца с электрическим током на пластины) составила 530 часов. По истечении 322-х часов воздействия были извлечены и исследованы первые две пластины, а по истечении 448-ми и 530-ти часов были извлечены и исследованы последние две пары пластин. С помощью инструментального микрометра и цифрового микроскопа (Hirox KH-7700) было произведено сравнение толщины и глубины микронеровностей (микроуглублений) части пластин, не подвергавшихся и подвергавшихся воздействию жидкого свинца с протекающим через него электрическим током.

В этом эксперименте на пластины воздействовал жидкий свинец и электрический ток, протекающий через границу пластин с жидким свинцом. Жидкий свинец вследствие выделения в нем джоулева тепла совершал конвективное движение с поднятием жидкого свинца в центре кюветы при опускании его у боковых стенок. Таким образом, на пластины воздействовал движущийся свинец.

Таблица 1

Удельное сопротивление контактной пленки между сталью 12X18H10T и жидким свинцом при разных способах обработки поверхности стали. Стальная кювета

Время выдержки в жидком свинце, ч	Температура свинца, °С	Удельное контактное электросопротивление (поверхность пластин не залужена), Ом·м ²	Удельное контактное электросопротивление (поверхность пластин залужена сначала галлием, затем оловом), Ом·м ²
0	$364 \pm 1,6$	$(3,49 \pm 0,38)10^{-8}$	
	$365,8 \pm 1,4$		$(0,41 \pm 0,17)10^{-8}$
322 (ток 750 А)	$347,8 \pm 2,8$	$(2,75 \pm 0,25)10^{-8}$	
530 (ток 870 А)	355 ± 2	$(2,84 \pm 0,20)10^{-8}$	

Оценим скорость такого конвективного течения жидкого металла. Для этого приравняем число Рейнольдса Re (имеющего смысл отношения инерционных сил, действующих в жидком металле к вязким силам) к корню из числа Грасгофа Gr (имеющего смысл отношения сил плавучести при гравитационной конвекции к вязким силам) [14]:

$$Re = Gr^{0.5}, \quad VL/\nu = (g\beta\Delta TL^3/\nu^2)^{0.5}, \quad (2)$$

где β – коэффициент температурного расширения; ΔT – разность температур; L – характерный размер процесса; ν – кинематическая вязкость металла.

В этом выражении для жидкого свинца при условиях нашего эксперимента $L = 0,015$ м; $g = 9,81$ м/с²; $\beta = 11,9$ 1/°К; $\nu = 0,214 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Оценку для ΔT можно сделать из следующих соображений: в этом эксперименте кювета со свинцом стояла на теплоизоляторе и сверху была прикрыта муллитовой крышкой, через свинец в кювете протекал электрический ток силой 750 А, при этом выделялось тепло $Q = 197$ Вт, которое передавалось в окружающее пространство преимущественно через боковые стенки площадью $S = 108$ см². Коэффициент теплопроводности жидкого свинца ($\lambda = 16,5$ Вт/м°К).

Используя уравнение Фурье для теплопередачи [15] можно оценить, что $\Delta T = QL/\lambda S = 15,4$ °С. Подставив эту оценку и другие известные значения в выражение (2), получим, что скорость конвективного течения V , омывающего пластины в кювете, может достигать 1,7 см/с, а во второй половине эксперимента, когда ток через кювету был увеличен до 870 А, конвективная скорость могла достигать 1,9 см/с. При этом жидкий свинец опускался у стенок кюветы и поднимался вверх в ее центре.

Таким образом, в нашем эксперименте пластины из нержавеющей стали подвергались воздействию электрического тока (с плотностью 1,1 – 1,45 А/мм²) и жидкого свинца, омывающего их со скоростью около 1,5 – 1,9 см/с.

При визуальном осмотре двух пластин, извлеченных после 322-х, 448-ми и 530-ти часов воздействия на них жидким свинцом с электрическим током, мы обнаружили почернение их поверхности, погружаемой в свинец, с образованием темного налета. Поверхность пластины, находившаяся на воздухе, также потемнела, но заметно меньше, чем погружаемая ее часть. Других заметных изменений визуально обнаружено не было (рис. 4).

Мы произвели измерение толщины пластин, а также измерили глубину неровностей на участках поверхностей пластин, которые были погружены в жидкий свинец и которые оставались на воздухе (рис. 5).

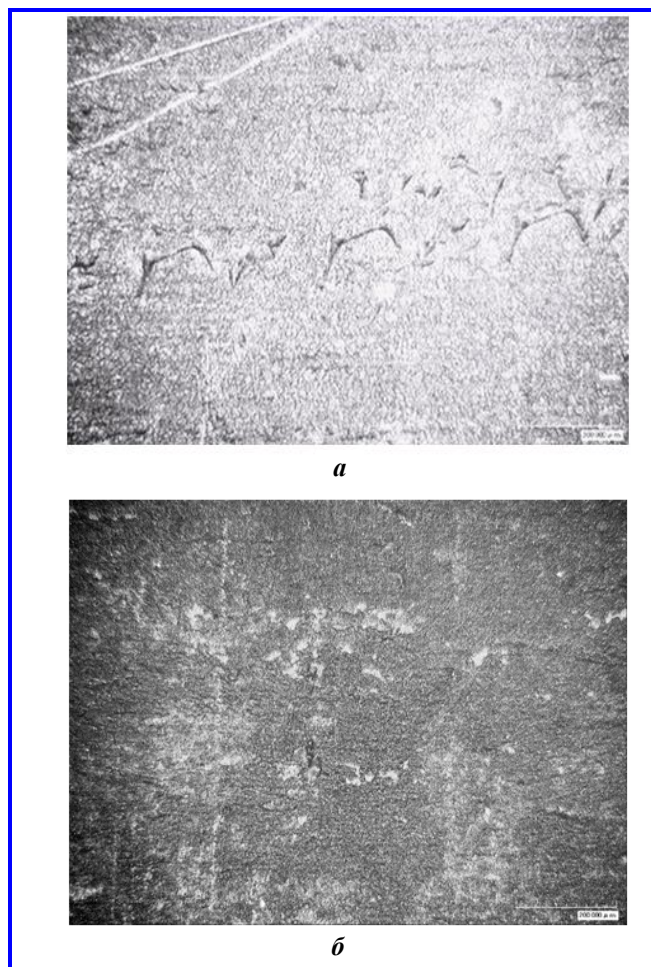


Рис. 4. Фото поверхности пластины (увеличение в 280 раз):
а – поверхность, находившаяся на воздухе;
б – поверхность, находившаяся в жидком свинце

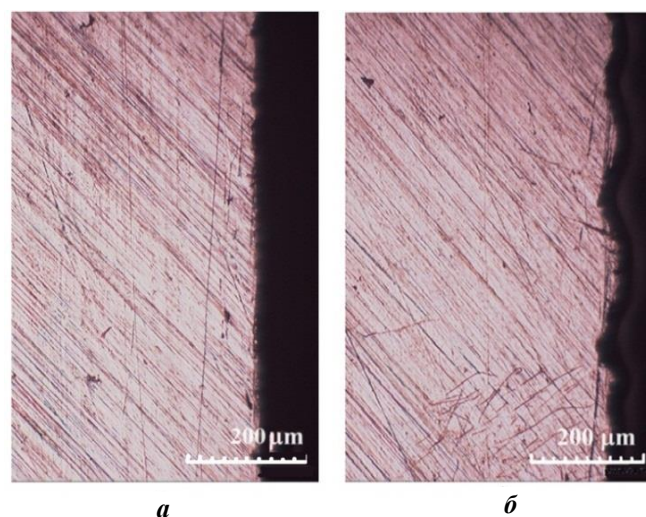


Рис. 5. Фото торцевых частей пластины (увеличение в 970 раз): а – часть торца пластины, остававшейся на воздухе (справа видна граница контакта пластины с воздухом); б – часть торца пластины, которая погружалась в жидкий свинец (справа видна граница контакта с жидким свинцом)

Таблица 2

Воздействие расплава свинца с протекающим электрическим током на микроуглубления и на толщину пластин из стали 12X18н10Т с течением времени

	322 часа	448 часов	530 часов
Средняя толщина не погруженной в свинец части пластин, мкм	990 ± 1,9	1011,5 ± 7,44	1030 ± 24,99
Средняя толщина погруженной в свинец части пластин, мкм	990 ± 3,0	994,25 ± 3,42	1025,15 ± 8,65
Средняя глубина углублений на поверхности пластин, не погруженных в свинец, мкм	15,3 ± 3,21	10,67 ± 2,35	10,72 ± 2,3
Средняя глубина углублений на поверхности пластин, погруженных в свинец, мкм	21,02 ± 5,56	13,76 ± 2,63	11,83 ± 2,14

Измерения толщины пластины производились инструментальным микрометром в 14-ти точках на погружаемой и не погружаемой части пластин, а измерение глубины микроуглублений производилось оптическим цифровым микроскопом с увеличением в 970 раз в 28-ми точках на нижней части пластин, погружаемых в свинец, и в 28-ми точках на части пластин, оставшихся на воздухе.

В результате было обнаружено, что после нахождения в жидком свинце с протекающим электрическим током в течение 322-х часов средняя толщина двух пластин практически не изменилась (табл. 2).

Как видно из результатов эксперимента (см. табл. 2) вначале наибольшее разрушение происходит в микроуглублениях на поверхности пластин. Затем по мере общего разрушения поверхности глубина микроуглублений снижается. Максимальное разрушение пластин с учетом разрушения в микроуглублениях на поверхности с течением времени с вероятностью 95%, как показал эксперимент, растет линейно (рис. 6).

Заключение

Как показал эксперимент (см. табл. 1), удельное поверхностное электросопротивление нержавеющей стали 12X18Н10Т с жидким свинцом снизилось на 21% после 322-х часов воздействия на нее жидким свинцом с электрическим током и после 530-ти часов воздействия практически не изменилось. Это контактное удельное электросопротивление оказалось почти в шесть раз выше, чем контактное сопротивление нержавеющей стали с жидким галлием [1]. В то же время после облуживания поверхности нержавеющей стальных пластин оловом их контактное сопротивление почти на порядок (в 8,6 раза) снизилось

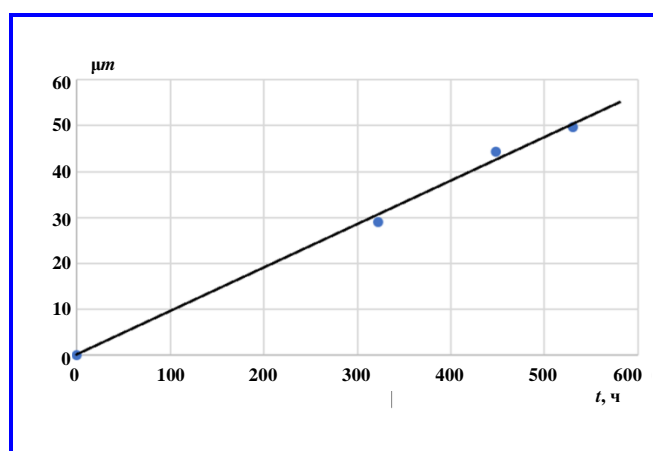


Рис. 6. Зависимость максимально возможной глубины разрушения поверхности пластины от времени воздействия жидкого свинца

и приблизилось к контактному сопротивлению нержавеющей стали с галлием. Электросопротивление облуженной оловом стали с жидким свинцом стало даже меньше на 31%, чем стали с жидким галлием [1].

Жидкий свинец, контактирующий с нержавеющей сталью совместно с электрическим током, проходящим через границу их контакта, очень слабо растворяет сталь. По результатам эксперимента можно сделать прогноз, что после 1200 часов контакта стали 12X18Н10Т с жидким свинцом при протекании тока через границу раздела значения разрушения стали будут несколько выше, чем были получены в эксперименте [12] со свинцом, но без электрического тока. Однако это разрушение даже после 1200 часов контакта будет оставаться незначительным (не более 114 мкм по глубине). В то же время надо отметить, что в каналах МГД-насосов металл движется со скоростью порядка метров

в секунду, и это на два порядка выше течений, которые были в нашем эксперименте, вызванных термогравитационной конвекцией. Представляется полезным учесть в будущих экспериментальных исследованиях влияние скорости обтекания свинцом образца при протекании через него электрического тока.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетным планом ИМСС УрО РАН на 2024 – 2028 гг. (научно-исследовательская работа № 124012300246-9 «Крупномасштабные течения и теплообмен в проводящей и непроводящей жидкости в условиях мелкомасштабной турбулентности»).

Литература

1. Митюрёв, А. А. Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды / А. А. Митюрёв. – DOI : 10.46573/2658-5030-2023-1-5-10 // Вестник Тверского государственного технического университета. Машиностроение и машиноведение. – (Серия «Технические науки»). – Тверь : Тверской государственный технический университет, 2023. – № 1 (17). – С. 5–10.
2. Митюрёв, А. А. Некоторые закономерности применения промежуточных жидкометаллических сред в скользящих электрических контактах / А. А. Митюрёв. – DOI : 10.46573/2658-5030-2023-1-11-18 // Вестник Тверского государственного технического университета. Машиностроение и машиноведение. – (Серия «Технические науки»). – Тверь : Тверской государственный технический университет, 2023. – № 1 (17). – С. 11–18.
3. Измайлов, В. В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты композит медь – карбид хрома / В. В. Измайлов, М. В. Новосёлова. – DOI : 10.46573/2658-5030-2021-15-20 // Вестник Тверского государственного технического университета. Машиностроение и машиноведение. – (Серия «Технические науки»). – Тверь : Тверской государственный технический университет, 2021. – № 2 (10). – С. 15–20.
4. Геча, В. Я. Определение контактного сопротивления для токосъёма униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 145. – № 2. – С. 3–7.
5. Мизин, А. И. Достоинства и недостатки униполярных машин / А. И. Мизин, Т. И. Сокирко // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2023. – Т. 194. – № 3. – С. 3–9.
6. Субботин, В. И. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики / В. И. Субботин, М. Н. Арнольдов, Ф. А. Козлов [и др.] // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – Вып. 1. – С. 31–42.
7. Авторское свидетельство № 786807 СССР, МКИ H02K 44/02. Электромагнитный спиральный насос : № 2799104/24-25 ; заявл. 17.07.1979 ; опубл. 1979 / В. М. Долгих, И. М. Кирко, С. Ю. Хрипченко. – 5 с.
8. Авторское свидетельство № 913527 СССР, МКИ H02K 44/02. Электромагнитный спиральный насос : № 2960105/18-25 ; заявл. 23.07.80 ; опубл. 15.03.82 / В. М. Долгих, С. Ю. Хрипченко. – Бюл. № 10. – 2 с.
9. Патент № 2810528 Российская Федерация, МПК H02K44/06, F04D7/06. Электромагнитный индукционный насос для жидких проводящих сред : № 2023119291 : заявл. 21.07.2023 ; опубл. 27.12.2023 / С. Ю. Хрипченко, В. М. Долгих; заявитель ПФИЦ УрО РАН.
10. Писаревский, Л. А. Локальная коррозия аустенитных сталей и сплавов для теплообменных труб парогенераторов АЭС / Л. А. Писаревский, А. Б. Коростелев, А. А. Липатов // Черная металлургия. – 2019. – № 2. – С. 227–241.
11. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМЕ-2018) : сборник тезисов докладов V конференции, 8–10 октября 2018. – Обнинск : ГНЦ РФ-ФЭИ, 2018. – 155 с.
12. Цупрун, Л. И. Исследование поведения нержавеющей стали 1X18H9T в контакте с жидким свинцом висмутом и их эвтектическим сплавом при температуре 500 – 600 °С / Л. И. Цупрун, М. И. Тарыгина // Доклады Советской делегации на международной конференции по мирному использованию атомной энергии. – Женева : Исследования в области геологии, химии и металлургии; Москва : Издательство АН СССР, 1955. – С. 285–292.
13. Яценко, Л. А. Галлий: Технологии получения и применение жидких сплавов: монография / С. П. Яценко, Л. А. Пасечник, В. М. Скачков [и др.]. – Москва : РАН, 2020. – 344 с.
14. Mixed Convection in Pipe and Duct Flows With Strong Magnetic Fields / O. Zikanov, I. Delyaev, Y. Listratov [et al.]. – DOI : 10.1115/1.4049833 // Applied Mechanics Reviews. – 2021. – Vol. 73(1): 010801. – № AMR-20-1081. – 35 p.
15. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва : Высшая школа, 1975. – 496 с. : с ил.

Поступила в редакцию 04.06.2024

Станислав Юрьевич Хрипченко, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник, e-mail: khrpich@icmm.ru.
Вениамин Михайлович Долгих, кандидат технических наук, ведущий инженер.
Т. 8 (342) 237-83-06.
(Институт механики сплошных сред УрО РАН).

THE IMPACT OF LIQUID LEAD ON THE CONTACT BOUNDARY WITH 12X18H10T STEEL AND THE ELECTRICAL RESISTANCE OF THIS BOUNDARY DURING THE FLOW OF ELECTRIC CURRENT

S. Yu. Khripchenko, V. M. Dolgikh

Experiments were conducted to determine the contact electrical resistance of the interface between 12X18N10T stainless steel and liquid lead. The experimental setup and methodology of the experiment are described. It was shown that after prolonged exposure (322 hours) to liquid lead with electric current flowing through it on the studied steel plates, the contact resistance decreased from $(3,49 \pm 0,38)10^{-8}$ Ом·м² to $(2,75 \pm 0,25)10^{-8}$ Ом·м², and after further prolonged exposure (530 hours), this resistance changed little. When tinning the sample surface with tin, the contact resistance decreases by almost an order of magnitude to $(0,41 \pm 0,17)10^{-8}$ Ом·м². The paper describes an experiment and presents its results on the study of the destructive effect of liquid lead on stainless steel plates when electric current flows through the lead and plates. It has been experimentally shown that even after 530 hours of exposure of the steel plates under study to liquid lead with electric current, no significant surface damage was observed.

Key words: boundary electrical resistance, experiment, liquid lead, stainless steel, surface failure.

References

- Miturev, A. A. Research of electrical conductivity of intermediate liquid-metal environment / A. A. Miturev. – DOI : 10.46573/2658-5030-2023-1-5-10. // Vestnik of Tver State Technical University. Machinery Engineering and Science of Machines. – (Series: «Technical Sciences»). – Tver : Tver State Technical University, 2023. – No. 1 (17) – P. 5–10.
- Miturev, A. A. Some patterns of application of intermediate liquid-metal environments in slide electric contacts / A. A. Miturev. – DOI : 10.46573/2658-5030-2023-1-11-18 // Vestnik of Tver State Technical University. Machinery Engineering and Science of Machines. – (Series: «Technical Sciences»). – Tver : Tver State Technical University, 2023. – No. 1 (17). – P. 11–18.
- Izmaylov, V. V. Electrocontact properties of the material containing refractory components: cooper – chromium carbide composite / V. V. Izmaylov, M. V. Novoselova. – DOI : 10.46573/2658-5030-2021-15-20 // Vestnik of Tver State Technical University. Machinery Engineering and Science of Machines. – (Series: «Technical Sciences»). – Tver : Tver State Technical University, 2023. – No. 2 (10). – P. 15–20.
- Gecha, V. Ia. Determination of contact resistance for current-pick off of unipolar electrical machine / V. Ia. Gecha, A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JSC, 2015. – Vol. 145. – No. 2. – P. 3–7.
- Mizin, A. I. Advantages and disadvantages of unipolar machines / A. I. Mizin, T. I. Sokirko // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : VNIIEEM Corporation JSC, 2023. – Vol. 194. – No. 3 – P. 3–9.
- Subbotin, V. I. Liquid-metal heat transfer for nuclear power engineering / V. I. Subbotin. M. N. Arnoldov, F. A. Kozlov [et. al] // Atomic Energy. – 2002. – Vol. 92 – Issue 1. – P. 31–42.
- Inventor's Certificate No. 786807 USSR, IPC H02K 44/02. Electromagnetic spiral pump: No. 2799104/24-25 : appl.17/07/1979: publ. 1979 / V. M. Dolgikh, I. M. Mirko, S. Yu Khripchenko. – 5 p.
- Inventor's Certificate No. 913527 USSR, IPC H02K 44/02. Electromagnetic spiral pump: No. 2960105/18-25: appl. 23.07.80 : publ. 15.03.82 / V. M. Dolgikh, S. Yu Khripchenko. – Bul. No. 10 – 2 p.
- Patent No. 2810528 Russian Federation, IPC H02K44/06, F04D7/06. Electromagnetic induction pump for liquid conductive environments : No. 2023119291 : appl. 21.07.2023 : publ. 27.12.2023 / S. Yu Khripchenko, V. M. Dolgikh; applicant: Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences.
- Pisarevskiy, L. A. Local corrosion of austenitic steels and alloys for heat-exchange tube of NPP steam-generators / L. A. Pisarevskiy, A. B. Korostelev, A. A. Lipatov // Ferrous Metallurgy. – 2019. – No. 2. – P. 227–241.
- Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-2018): Book of Abstracts of the Fifth Conference, October 8 – 10, 2018. – Obninsk : SSC RF – IPPE, 2018 – 155 p.
- Tsuprun, L. I. Research of 1X18H9T stainless steel behaviour in contact with liquid plumburn bismuth and their electrical alloy under the temperature of 500 – 600 °C / L. I. Tsuprun, M. I. Taritina // Reports of the Soviet delegation at the International Conference on the Peaceful Use of Atomic Energy. – Geneva : Research in the area of geology, chemistry and metallurgy; Moscow : Publishing of Academy of Sciences of USSR, 1955. – P. 285–292.
- Yatsenko, L. A. Gallium: Manufacturing technology and application of liquid alloys: monography / S. P. Yatsenko, L. A. Pasechnik, V. M. Skachkov [et. al]. – Moscow : Russian Academy of Sciences, 2020. – 344 p.
- Mixed Convection in Pipe and Duct Flows With Strong Magnetic Fields / O. Zikanov, I. Delyaev, Y. Listratov [et al.]. – DOI : 10.1115/1.4049833 // Applied Mechanics Reviews. – 2021. – Vol. 73(1) : 010801. – № AMR-20-1081. – 35 p.
- Nashchokin, V. V. Technical thermodynamics and heat transfer / V. V. Nashchokin. – Moscow : Vysshaya Shkola Publishing House (Higher School Publishing House), 1975. – 496 p. : illustrated.

*Stanislav Yurievich Khripchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher, e-mail: khripch@icmm.ru.
Veniamin Mikhailovich Dolgikh, Candidate of Technical Sciences, leading engineer.*

T. 8 (342) 237-83-06.

(Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science).