

03

К вопросу о поведении и устойчивости жидкого металла в квазиплоских электрических контактах

© С.Д. Самуйлов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: Sam.mhd@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 20 марта 2015 г. В окончательной редакции 10 ноября 2015 г.)

Контакты между проводниками, формирующиеся при относительно небольших давлениях, можно считать квазиплоскими. В ряде технологических процессов используется плавление материала подобных контактов при пропускании электрического тока, однако поведение жидкости в этих условиях не анализировалось. В настоящей работе такая оценка выполнена для конкретных условий, возникающих при электроимпульсном компактировании (брикетировании) металлической стружки. Анализ полученных выражений показал, что эта оценка справедлива для любых квазиплоских контактов при пропускании импульсного тока длительностью от десятков микросекунд до миллисекунд. Показано что контактные поверхности будут сближаться, жидкий металл будет выдавливаться в стороны, а площадь контакта и его проводимость будут расти. Перетяженная магнитогидродинамическая (МГД) неустойчивость и перегревная неустойчивость в этих условиях не развиваются, так как длина волны неустойчивости больше предполагаемой толщины расплавленного слоя, винтовая МГД неустойчивость может проявляться в более медленных процессах.

Введение

Определяющую роль процессы на контактах играют при электрической консолидации (компактировании, брикетировании) сыпучих материалов для получения пористой или компактной заготовки [1,2]. Существуют два варианта электрической консолидации материалов: с использованием постоянного тока или длинных импульсов тока, либо с использованием коротких импульсов тока с длительностью менее 0.1 с. В первом варианте энергия выделяется, главным образом, в зоне контактов, но из-за теплопроводности разогревает весь образец. Этот процесс широко используется в производстве. Более перспективным считается вариант, в котором происходит разогрев только контактной зоны, эти процессы в настоящее время широко исследуются. В рамках данного подхода в ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработана электроимпульсная технология брикетирования металлической стружки [3–7], которая позволяет осуществлять эффективный рециклинг отходов в виде брикетов и получать дешевые полуфабрикаты, материалы и изделия.

Первоначально считалось, что формирование брикетов осуществляется за счет твердотельных механизмов спекания контактов. Однако при изучении контактной зоны обнаружены следы плавления металла (рис. 1). Параллельно установлено, что, несмотря на сильный нагрев, существенного окисления и загрязнения металла азотом не происходит благодаря краткости воздействия. В связи с этим встал вопрос о поведении жидкого металла в зазоре между электродами. Будет ли жидкий мостик разрушен, например из-за пинч-эффекта или магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости формы, после чего может возникнуть электрический разряд, либо, напротив, контактные поверхности будут сближаться, а площадь и проводимость контактной зоны расти?

Для решения этого вопроса необходимо оценить баланс давлений, действующих на жидкий металл со стороны сил, стремящихся сжать или, напротив, раздвинуть контактные поверхности, а также устойчивость жидкой перемычки по отношению к возможным возмущениям. Отсутствие окисления зоны контакта косвенно указывает на отсутствие электрических разрядов в процессе электроимпульсного компактирования.

Применительно к сферическим гранулам и порошкам, состоящим из равноосных частиц, спрессованным при относительно большом давлении, вопрос устойчивости жидкой металлической перемычки в своих экспериментальных и теоретических исследованиях развивала группа ученых из БелНПО Порошковой металлургии [1,2,8–10]. Разработана теоретическая модель, которая позволяет связать прикладываемое механическое давление с величиной пропускаемого тока, обеспечивающей устойчивость жидкой металлической перемычки и тем самым оптимизировать технологический процесс. Эксперименты подтвердили работоспособность модели, получены изделия из титановых гранул с высокой прочностью, $\sigma_n = 20\text{--}40$ МПа [8–10].

Анализ теоретической модели и экспериментальных условий, при которых проводились эти опыты, показал, что модель не может быть использована при компактировании дисперсных материалов, состоящих из частиц с существенной степенью неравноосности, к числу которых относятся металлическая стружка, чешуйки, волокна. Это связано с тем, что материал, состоящий из сферических гранул или равноосных частиц, исходно имеет высокую насыпную плотность (для идеальных одинаковых сферических частиц при идеальной упаковке 74%). Уплотнение материала даже при значительном давлении относительно невелико и составляет несколько процентов, оно связано, главным образом,

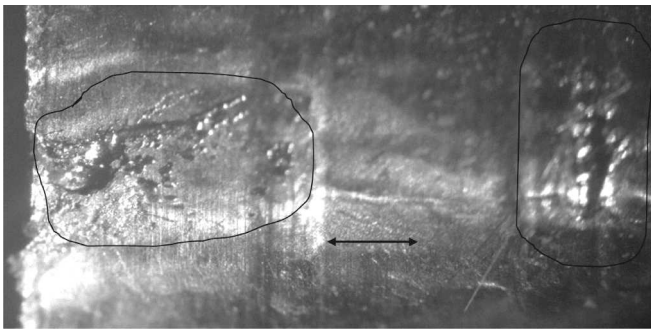


Рис. 1. Характерный внешний вид контактов. Линиями выделены зоны контактов, стрелкой обозначен отрезок 1 mm.

с пластической деформацией зон контакта частиц, при этом размеры контактов между частицами однозначно связаны с приложенным давлением.

Для материала, состоящего из неравноосных частиц, насыпная плотность зависит от формы частиц и может составлять всего несколько процентов от плотности компактного материала. Уплотнение происходит за счет изменения формы частиц при значительной упругой деформации, при этом плотность материала может быть увеличена в несколько раз (при брикетировании дробленой стружки характерный коэффициент уплотнения материала в 6 раз). Величина внешнего механического давления определяется необходимостью достижения заданной плотности компактируемого (брикетированного) материала. Электрический ток в этом случае течет через относительно небольшие проводящие контактные поверхности — a -пятна, вокруг которых имеется большая область, в которой зазор между электродами мал. Такие контакты в теории электрических контактов [11,12] называют квазиплоскими. При небольшом усилии контакты даже между сферическими гранулами являются квазиплоскими.

Кроме того, согласно представлениям, развитым в работе [12], контакты, за исключением особых условий, покрыты окисной пленкой толщиной $\sim 20 \text{ \AA}$, ток через которую течет благодаря эффекту туннелирования. В результате туннелирования электроны переходят в область с более высоким электрическим потенциалом и приобретают энергию. В экспериментах по электроимпульсному брикетированию величина этой энергии может составлять до 1 eV, поскольку считается, что сопротивление пленки составляет малую часть общего сопротивления контакта [12], а общее падение напряжения на контактной зоне составляет в этих опытах $\sim 4 \text{ V}$. Разумно полагать, что существенная часть энергии электронов выделяется в металле, непосредственно прилегающем к пленке и плавление происходит в тонком слое, толщина которого много меньше диаметра проводящего a -пятна, однако толщина расплавленного слоя не может быть меньше, чем несколько длин свободного пробега электронов в металле, т. е. $\sim 10^{-8} \text{ m}$.

В теории электрических контактов [10,12] поведение жидкого металла не рассматривается, поскольку плавление

приводит к сварке контактов и невозможности их размыкания, а такой режим недопустим. При контактной сварке [13] прочное сварное соединение возникает только при наличии жидкой ванны металла по всей поверхности контакта свариваемых деталей. Основная энергия вкладывается на стадии процесса от начала плавления локальных контактных зон и до появления жидкой ванны металла, эта стадия является определяющей, в тоже время процесс выделения тепла на этой стадии не поддается расчету, а на практике при выборе необходимой величины сварочного тока приходится руководствоваться имеющимся опытом. Сообщается [13], что при плавлении первоначальные контактные мостики могут разрушаться, что приводит к возникновению электрического разряда, однако обоснования этого тезиса не проводится.

Выполним оценку поведения жидкого металла, образовавшегося в квазиплоских контактах на месте первоначальных проводящих мостиков. Будем рассматривать наиболее простую ситуацию, которая представлена на рис. 2: жидкая металлическая перемычка находится между двумя плоскими параллельными контактными поверхностями и окружена воздухом. Оценку выполним для экспериментальных условий и параметров расчетной модели процесса электроимпульсного брикетирования металлической стружки, которые представлены в таблице [3,5]. В модели сжатая стружка представляется в виде решетки сопротивлений: контакты играют роль сопротивлений, а куски металла роль соединительных проводов. Считаем, что a_b — площадь, воспринимающая контактное усилие, примерно равна площади исходного проводящего a -пятна и поперечного сечения образовавшейся капли жидкого металла между электродами $a_b \approx a^2$, а толщина жидкого слоя много меньше его диаметра ($2r \ll a$).

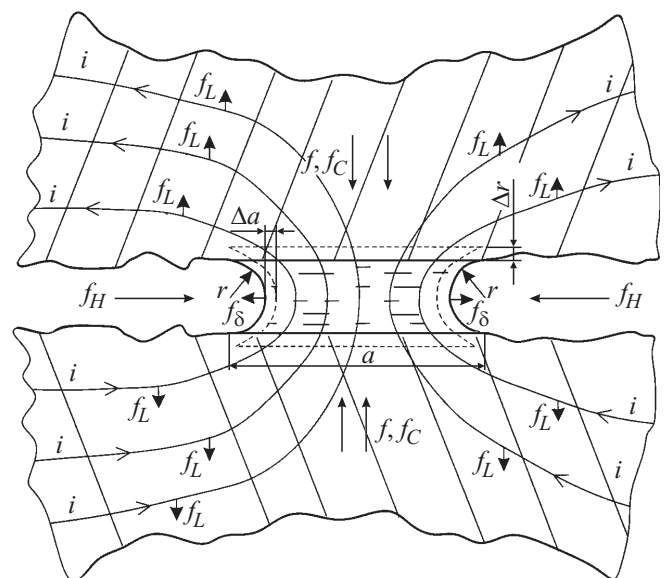


Рис. 2. Схема: жидкий металлический мостик между контактами в квазиплоском контакте.

Параметры эксперимента и расчетной модели для процесса электроимпульсного брикетирования металлической стружки

Параметры эксперимента	Значение параметра
Бригетируемый материал	Стружка титанового сплава 3М
Площадь отверстия прессформы (S),	$2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Давление, создаваемое прессом при сжатии стружки (P)	1 МПа
Длительность импульса тока (τ)	400 μs
Амплитуда импульса тока через образец (I)	150–300 кА
Параметры расчетной модели	Значение параметра
Число параллельных контактов (M)	30
Число последовательных контактов (N)	100
Диаметр проводящего a -пятна (a)	1 mm
Амплитуда тока через контакт i	5–10 кА
Напряжение на контакте (u)	4 V

Баланс давлений, воздействующих на жидкий металл со стороны сил, стремящихся сжать или раздвинуть контактные поверхности

Силы, которые стремятся сжать контактные поверхности

1. Внешнее давление со стороны пресса, которое создает первоначальное контактное усилие f и давление p . Для плоских контактов Хольм [1] предлагает следующую формулу:

$$f = \xi H a_b = \xi H a^2, \quad p = \xi H, \quad (1)$$

где ξ — поправочный коэффициент, который, согласно опыту, лежит в диапазоне $1/3 < \xi < 1$ (принимается $\xi = 0.5$), H — контактная твердость. Согласно [1,2], она в 3 раза больше твердости материала, определяемой стандартными методами. Для нашего случая (титановый сплав 3М) $H = 800$ МПа, давление в зоне контакта $p = 400$ МПа, контактное усилие $f = 400$ Н, для контакта площадью $\sim 1 \text{ mm}^2$. С другой стороны, создаваемое прессом контактное усилие и давление в зоне контакта можно рассчитать по следующим формулам:

$$f = SP/M; \quad p = SP/Ma^2, \quad (2)$$

где $f = 600$ Н, $p \approx 600$ МПа. При сравнении этой величины со значением, рассчитанным выше по методике [11], видно, что они близки, разница связана с тем, что часть усилия пресса передается на стенки прессформы за счет трения стружки о стенки, а также с тем, что не вся поверхность, воспринимающая усилие, является проводящей.

Контактное усилие приложено к зоне контакта до пропускания тока и уравновешено силой упругости упруго деформированного металла, ее окружающего. Характер его действия принципиально отличается при электроимпульсной обработке сжатого материала из равноосных частиц (гранул) и неравноосных частиц

(стружки, чешуек, волокон). При сжатии материала из равноосных частиц упругая деформация незначительна. При импульсном плавлении контакта происходит разгрузка при незначительном перемещении контактных поверхностей, и контактное усилие перестает действовать. Эта сила начинает действовать вновь тогда, когда придет в движение плунжер пресса. Для наиболее быстрого прессы через доли секунды. В этом случае процессы нагрева и компактирования имеют разный временной масштаб [1]. При сжатии засыпки из неравноосных частиц они подвергаются значительной упругой деформации. В частности, при снятии давления без электроимпульсной обработки высота загрузки из стружки увеличивается в 1.5–2 раза. При плавлении контакта разгрузки не происходит, контактное усилие продолжает действовать, практически не уменьшаясь.

2. Электростатическое притяжение контактов для квазиплоских контактов согласно Хольму [11]:

$$f_c = u^2(3f + 4.5)10^{-2} \text{ [N];}$$

$$p_c = u^2(3f + 4.5)10^{-2}/a^2 \text{ [Pa],} \quad (3)$$

$f_c = 300$ Н, $p_c = 300$ МПа. Электростатическое притяжение контактов возникает в начале процесса пропускания электрического тока при подаче напряжения и действует до тех пор, пока сохраняется электрическое напряжение на контактной зоне.

3. Поверхностное натяжение жидкого металла p_σ .

Будем считать, что количество жидкости не меняется в момент ее сжатия. Тогда (рис. 2) при аксиальном сжатии жидкой металлической перемычки, т.е. при уменьшении ее диаметра a , увеличиваются ее высота и зазор между контактными поверхностями. Уменьшается площадь контакта на обеих контактных поверхностях. Свободная поверхность и поверхностная энергия в этом случае увеличиваются за счет работы внешних сил, соответственно поверхностное натяжение противостоит магнитному сжатию. Для расчета воспользуемся энергетическим подходом, предложенным Релеем. Считаем что диаметр a уменьшается на величину $2\Delta a$ (рис. 2),

а расстояние между электродами, равное $2r$, где r — радиус кривизны жидкого мениска, увеличивается на величину $2\Delta r$, и свободная поверхность увеличивается на величину

$$\begin{aligned}\Delta S &= 2\pi a\Delta a + \pi^2(r + \Delta r)(a - 2\Delta a) - \pi^2ra \\ &\approx 2\pi a\Delta a(1 + \pi\Delta r/2\Delta a - \pi r/a).\end{aligned}$$

Считаем, что мениск в сечении имеет форму полукруга; его площадь равна половине площади тора: $S_m = \pi^2ra$; $r \ll a$, $\Delta a \ll a$. Считая, что объем жидкости не меняется, получаем $\pi^2ra\Delta a \approx 2\pi a\Delta r$; $\Delta r/\Delta a \approx \pi r/2a$;

$$\Delta S \approx 2\pi\Delta a(a - 0.7r).$$

Соответствующее изменение поверхностной энергии равно работе внешних сил

$$\sigma\Delta S = p_0S_m\Delta a, \quad \sigma 2\pi\Delta a(a - 0.7r) = p_\sigma\pi^2ra\Delta a,$$

отсюда

$$p_\sigma = \sigma(0.6/r - 0.2/a). \quad (4)$$

Подставляя для титана коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла $\sigma = 1.360 \text{ N/m}$ и $r \sim 0.1a$, $a \sim 1 \text{ mm}$, получаем значение $p_\sigma = 0.08 \text{ МПа}$. В то же время при минимально возможной толщине жидкой перемычки, которая не может быть меньше нескольких длин свободного пробега электронов в металле, т. е. при $r \sim 10^{-8} \text{ m}$, поверхностное натяжение жидкого металла $p_\sigma = 80 \text{ МПа}$ вносит небольшую добавку в суммарное давление сжатия. В частности, в том случае, если жидкий металлический мостик образовался в результате пробоя окисной пленки, проводимость которой обеспечивается за счет эффекта туннелирования при толщине пленки $\sim 20 \text{ \AA}$.

При разрушении жидких проводников электрическим током за счет возбуждения МГД-неустойчивости формы проводника [14] силы поверхностного натяжения играют основную роль наряду с магнитным давлением, а в рассматриваемом случае они относительно невелики.

Таким образом, основные силы, которые стремятся сжать контактные поверхности: контактное усилие и электростатическое напряжение. Эти силы начинают действовать в самом начале процесса пропускания тока.

Силы отталкивания контактов

4. Сила электродинамического отталкивания между контактами (пондермоторная), f_L , согласно Хольму [11]:

$$f_L \approx 10^{-7}i^2 \ln(B/a), \quad p_L \approx 10^{-7}i^2 \ln(B/a)/a^2, \quad (5)$$

где i — амплитуда импульса тока: 10 kA , B — характерный размер области стягивания тока, отношение B/a , согласно Хольму [11], лежит в пределах 5–10. Тогда $f_L \sim 20 \text{ N}$, $p_L = 20 \text{ МПа}$.

5. Магнитное давление, стремящееся сжать жидкий металл и оборвать ток

$$p_H = 0.5HB = \mu\mu_0i^2/8\pi^2(a/2)^2. \quad (6)$$

Подставляя $i = 10 \text{ kA}$, $a = 1 \text{ mm}$, получаем $p_H = 7 \text{ МПа}$.

Фактически силы отталкивания это силы одной природы, воздействующие на разные части зоны контакта. Они пропорциональны квадрату электрического тока и достигают максимума на максимуме тока.

Суммарное давление на жидкий металл в зоне контакта

Суммируя (формулы (1), (3)–(6)), получаем, что для нашего случая давление, сжимающее контактные поверхности, больше:

$$p + p_C + p_\sigma \approx 700 \text{ МПа} > p_L + p_H \approx 27 \text{ МПа}.$$

Суммарное давление

$$\begin{aligned}p_\Sigma &= \xi H + u^2(3f + 4.5)10^{-2}/a^2 + \sigma(0.6/r - 0.2/a) \\ &- 10^{-7}i^2 \ln(B/a)/a^2 - \mu\mu_0i^2/8\pi^2(a/2)^2 \approx 700 \text{ МПа}.\end{aligned} \quad (7)$$

При таком соотношении давлений жидкий металл будет выдавливаться в стороны, площадь контакта будет увеличиваться и после остывания металла произойдет сварка. Часть металла может быть выброшена из зазора в виде капель.

Динамика процесса сжатия

Если предположить, исходя из условий нашего эксперимента, что под действием сжимающих сил приходит в движение фрагмент стружки площадью $\sim 10 \text{ mm}^2$, толщиной 1 mm и массой $m \sim 45 \text{ mg}$, то зазор толщиной $r = 0.1 \text{ mm}$ сожмется за время $t = (2rm/a^2p_\Sigma)^{1/2} \sim 30 \mu\text{s}$, т. е. развитие контакта будет происходить в процессе прохождения тока и плавления. С началом плавления рост тока не будет приводить к росту напряжения на контакте. Это подтверждают осциллограммы тока и напряжения на образце (рис. 3). В первом варианте (рис. 3, а) не происходит консолидации (брикетирования) образца, а осциллограмма напряжения повторяет осциллограмму тока. При большей амплитуде тока (рис. 3, б) происходит консолидация, в этом случае формируется плоская вершина импульса напряжения с амплитудой 500 V . Считая, что, согласно нашей модели, число слоев стружки в образце $N = 100$ (таблица), можем вычислить напряжение на одном слое $u = U/N = 5 \text{ V}$. Аналогичная картина наблюдается для образцов более высокой плотности при всех амплитудах пропускаемого тока, при которых происходит образование брикетов, а также и для образцов из стальной

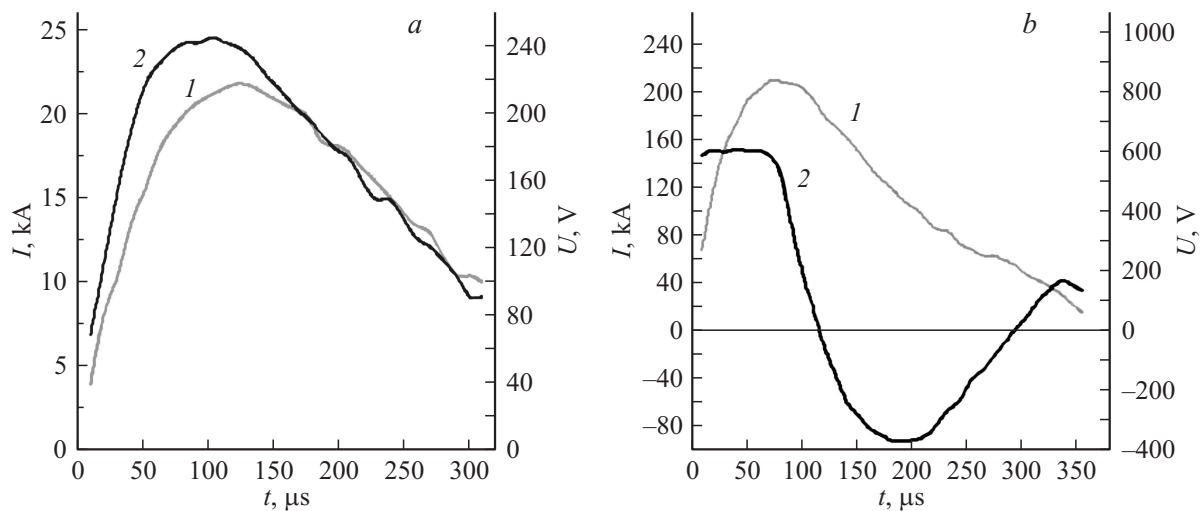


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на образце: 1 — осциллограмма тока через образец, 2 — осциллограмма напряжения на образце U ; a — плотность образца 0.5 g/cm^3 (12% металла), зарядное напряжение батареи $U_c = 500 \text{ V}$. Прочность отсутствует, извлекаемая стружка рассыпается; b — то же, зарядное напряжение батареи $U_c = 2500 \text{ V}$. Сформирован прочный брикет, нагрузка при разрыве при одноосевом растяжении 310 N .

стружки, магнитной и немагнитной. Средняя величина напряжения на слое стружки $\sim 4 \text{ V}$. Эта величина на порядок превышает напряжение плавления на постоянном токе, которое, согласно Хольму [11], для большинства металлов составляет доли вольта. Различие может быть связано с дополнительным индуктивным падением напряжения как в зоне контакта, так и на соединяющих эти зоны кусках проводника, однако основное отличие связано с условиями отвода тепла. При плавлении контакта на постоянном токе в установившемся стационарном режиме окружающий зону контакта металл прогреет за счет теплопроводности, поэтому градиент температуры и тепловой поток из зоны контакта минимальны. Импульсное плавление осуществляется в условиях, при которых окружающий металл не успевает нагреться, соответственно создается большой градиент температуры между зоной контакта и окружающим металлом (в зоне контакта достигается температура плавления, а окружающий ее металл еще не нагрет) соответственно большой тепловой поток из зоны контакта.

Остывание и кристаллизация металла будут происходить после завершения импульса тока, в данном случае очень быстро из-за хорошего отвода тепла в не разогретые области контактирующих проводников.

Анализ соотношения давлений сжатия и отталкивания контактных поверхностей в зависимости от параметров процесса

Рассмотрим, как изменится соотношение (7) при изменении размера контакта a и других параметров процесса. Согласно модели, контакты одного слоя включены параллельно и напряжение u на них одинаковое, а

величина тока i зависит от напряжения и сопротивления области стягивания тока $r_a = \rho/a$, где ρ — удельное электрическое сопротивление металла [11], тогда величину тока через контакт можно выразить следующим образом: $i = u/r_a = au/\rho$. Тогда выражение (7) примет следующий вид:

$$p_{\Sigma} = \xi H + u^2(3\xi H + 4.5/a^2)10^{-2} + \sigma(2/r - 1/a) - 10^{-7}(u/\rho)^2(\ln(B/a) + 2\mu/\pi).$$

Первый член выражения — контактное давление $p = \xi H$ не зависит от размера контакта, а зависит только от твердости материала контактов. В то же время, согласно нашей оценке, это наибольшее сжимающее давление. Поэтому для большинства металлов и сплавов, более твердых, чем наш относительно мягкий титановый сплав 3М, это давление будет определяющим.

Электростатическое притяжение контактов $p_c = u^2(3\xi H + 4.5/a^2)10^{-2}$ может давать существенную добавку к сжимающему давлению, оно зависит, главным образом, от напряжения на контакте u и от контактного давления (поскольку второй член выражения в скобках относительно мал). В данном случае напряжение на контакте — это напряжение плавления на импульсном токе, аналогичное напряжению плавления на постоянном токе. Эта величина зависит от материала контактов и скорости ввода энергии, а также может зависеть от размера контакта и других параметров, но эти зависимости пока не известны.

Роль поверхностного натяжения p_{σ} останется незначительной даже при минимально возможной толщине расплавленного слоя.

Силы отталкивания контактов — это электродинамическое отталкивание и магнитное давление: $p_L + p_H =$

$= -10^{-7}(u/\rho)^2(\ln(B/a) + 2\mu/\pi)$. Необходимо определить, не могут ли какие-либо факторы привести к их существенному росту и смене сжатия контактов отталкиванием. Эти силы зависят от импульсного напряжения плавления и электропроводности материала. Рост импульсного напряжения плавления не может приводить к смене знака суммарного давления, так как при этом растут не только электродинамические, но и электростатические силы, которые, по нашей оценке, существенно больше. В то же время для хорошо проводящих мягких материалов, таких как медь, соотношение давлений (7) в принципе может поменять знак, так как твердость их несколько ниже, а удельное электрическое сопротивление существенно меньше, чем у титанового сплава 3М. Подробные исследования на этот счет не проводились, но пробные брикеты из меди, латуни и алюминия получены, при этом необходимая для компактирования величина электрического тока существенно больше, чем для титана.

Таким образом, наша оценка показывает, что жидкий металлический мостик между квазиплоскими контактами не может быть разрушен за счет магнитного давления и электродинамического отталкивания. Вследствие преобладания сил сжатия контактные поверхности будут сближаться, а жидкий металл будет выдавливаться в стороны.

При увеличении скорости нарастания электрического тока (короткие импульсы тока) плавление и развитие контакта начнутся быстрее, но плотность тока в контакте не увеличится. Так будет происходить до тех пор, пока время нарастания тока не станет меньше, чем время сжатия контакта (время сжатия проводников, согласно выше приведенной оценке, $\sim 30 \mu\text{s}$). При существенно большей скорости нарастания тока возможно разрушение контактного мостика за счет взрывного испарения металла.

При уменьшении скорости нарастания тока плавление начнется позже, однако характер процесса не изменится до тех пор, пока скорость ввода энергии будет больше, чем скорость отвода тепла. Для того, чтобы исключить разогрев металла за пределами области контакта, длительность импульса тока τ должна быть меньше, чем время диффузии тепла из зоны контакта за счет теплопроводности [3–5]:

$$\tau < \frac{a^2 c \gamma_m}{10\kappa},$$

где c — теплоемкость металла, γ_m — плотность металла, κ — коэффициент теплопроводности металла. При более медленном вводе энергии будет происходить постепенный переход к режиму компактирования, связанному с разогревом всего образца.

Оценка устойчивости жидкого металлического мостика

Рассмотрим возможность развития МГД-неустойчивости формы жидкого металла, находящегося в зазоре

между контактными поверхностями. В работе [3] данный вопрос рассматривался. В случае электроимпульсного брикетирования металлической стружки плотность тока в контакте $j \approx i/a^2 \approx 10^6 \text{ A/cm}^2$. Указанная плотность тока лежит в том диапазоне, в котором наибольший вклад в разрушение проводника вносит МГД-неустойчивость [14]. Время разрушения, вычисленное по формулам [14], составляет $\approx 30\text{--}50 \mu\text{s}$. Сделан вывод, что при плавлении такой контакт будет разрушен. Причина разрушения — развитие МГД-неустойчивости нулевой моды. Однако указанные формулы разработаны для бесконечно длинных проводников, а опыты проводились с длинными тонкими проволочками. В то же время, если вычислить длину волны неустойчивости по формулам из работы [14], $\lambda_{\text{noneq}} = 0.3a = 0.3 \text{ mm}$. Длина волны меньше диаметра жидкого мениска, но больше, чем предполагаемая его толщина (0.1 mm), следовательно, перетяжная неустойчивость не может развиваться при плавлении металла в квазиплоских контактах. По аналогичной причине не может развиваться и перегревная неустойчивость [15], длина волны которой при указанной плотности тока $\approx 1 \text{ mm}$.

Неустойчивости высших мод [13] в жидких проводниках проявляться не могут и не наблюдаются. А неустойчивость первой моды (винтовая), связанная с осевой несимметрией токопровода, будет проявляться. Действительно, в нашем случае трудно ожидать, что ток к контакту будет подходить осесимметрично. Если же, как показано на рис. 2, величина тока, подходящего к зоне контакта слева, будет больше, чем величина тока, подходящего справа, то и магнитное давление слева будет больше, чем справа. Эта сила ничем не уравновешена, жидкий металл под действием этой силы будет смещаться в одну сторону, и может быть выброшен из зазора. Сделать какие-либо оценки скорости развития неустойчивости в этом случае затруднительно, однако следует заметить, что магнитное давление существенно меньше, чем давление сил сжатия.

Таким образом, жидкий металл в контакте будет растекаться под действием внешнего давления, а из-за несимметрии магнитного давления часть металла может выбрасываться из зазора в виде капель, причем, главным образом, в одну сторону. При исследовании зоны контакта действительно видны капли металла, выброшенные в одну сторону (рис. 1), однако нет достаточных оснований утверждать, что это является проявлением винтовой неустойчивости. При существенно более медленном нарастании электрического тока винтовая неустойчивость может играть более заметную роль и приводить к обрыву тока и возникновению электрических разрядов.

Выводы

Таким образом, при импульсном плавлении металла в квазиплоских контактах и длительности импульса тока от десятков микросекунд до миллисекунд возникающая жидкость выдавливается из зазора в стороны за счет

контактного давления и электростатического притяжения контактных поверхностей, а площадь контакта и его проводимость увеличиваются. В результате формируются прочные металлические мостики, которые и создают прочность материала.

При пропускании существенно более коротких импульсов тока (длительностью несколько микросекунд и менее) возможно взрывное испарение металла в зоне контакта. При использовании существенно более длинных импульсов тока жидкость может быть выброшена из зазора между электродами за счет несимметрии токопровода (винтовая МГД-неустойчивость). Если контакт не является квазиплоским, т. е. длина возникающей жидкой перемычки между электродами больше или порядка ее диаметра, перемычка будет разрушена за счет перетяжной МГД-неустойчивости.

Список литературы

- [1] Деменюк В.Д., Юрлова М.С., Лебедева Л.Ю., Григорьев Е.Г., Олевский Е.А. // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. № 3. С. 195–239.
- [2] Yurlova M.S., Demenyuk V.D., Lebedeva L.Y., Dudina D.V., Grigoryev E.G., Olevsky E.A. // J. Mater. Sci. 2014. Vol. 49. N 3. P. 952–985.
- [3] Самуйлов С.Д. Электрофизический метод брикетирования металлической стружки. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 136 с.
- [4] Abramova K.B., Samujlov S.D., Filin Yu.A. // Proc. of the conf. „Titanium’99: Science and Technology“. Saint-Petersburg, Russia, 2000. Vol. 3. P. 1311–1320.
- [5] Абрамова К.Б., Бочаров Ю.Н., Самуйлов С.Д., Щербатов И.П. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 4. С. 122–127.
- [6] Пузаков И.Ю., Корнилова М.А., Самуйлов С.Д., Крестянинов Д.А. // Технология легких сплавов. 2011. № 1, С. 98–107.
- [7] Самуйлов С.Д. // Технология металлов. 2012. № 9. С. 29–35.
- [8] Белявин К.Е., Галкин А.Е., Прежина Т.Е., Минько Д.В., Максименко Л.Л. // Цветные металлы. 1991. № 10. С. 55–57.
- [9] Витязь П.А., Капцевич В.М., Косторнов А.Г., Шелег В.К., Георгиев В.П. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов. М.: Металлургия. 1993. 240 с.
- [10] Белявин К.Е., Минько Д.В., Кузнецик О.О. // Инженерно-физический журн. 2004. Т. 77. Вып. 3. С. 136–143.
- [11] Хольм Р. Электрические контакты. М.: Мир, 1961. 464 с.
- [12] Омельченко В.Т. Теория процессов на контактах. Харьков: Вища школа, 1979. 126 с.
- [13] Кочергин К.А. Сварка давлением: Учебник для вузов. Л.: Машиностроение, 1972. 215 с.
- [14] Абрамова К.Б., Златин Н.А., Перегуд Б.П. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. Вып. 6. С. 2007–2022.
- [15] Лев М.Л., Перегуд Б.П. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 6. С. 1205–1211.