

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2011 В.А. Барвинок¹, А.Н. Кирилин², В.П. Самохвалов¹,
В.М. Вершигоров², Ю.Е. Паламарчук²

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)
² ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Поступила в редакцию 12.05.2011

В проведенной работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования по обработке процессов управления последеформационными свойствами материала деталей с целью улучшения их эксплуатационных характеристик. Проведено обоснование выбора источника импульсного тока. Рассмотрены два варианта: обработка с помощью импульсного тока прямого пропускания от магнитно-импульсной установки; обработка импульсами тока от сварочного трансформатора для точечной контактной сварки. В процессе работы выполнено проектирование и изготовление опытной оснастки и проведен подбор оборудования. Разработаны методы определения оптимальных режимов воздействия на заготовки из различных материалов.

Ключевые слова: последеформационные свойства, магнитно-импульсное поле, остаточные напряжения, изменение структуры, тепловое воздействие, магнитное воздействие

В результате анализа дефектов формы и структуры металла, существующих в деталях, полученных методами пластического деформирования, в том числе с применением импульсного магнитного поля определено наличие остаточных напряжений всех трёх родов.

Неравномерности нагружения являются одной из основных причин неоднородностей силового поля внутри объема деформируемой заготовки, приводящие к появлению остаточных напряжений I рода.

Второй причиной является взаимодействие деформируемой заготовки с технологической оснасткой - оправкой или матрицей.

Неоднородность пластических деформаций связанных с окончательной формой получаемой детали приводят к появлению остаточных напряжений II рода.

В определенном диапазоне магнитно-импульсного воздействия удалось полностью снять оста-

точные напряжения от теплового удара, а также от неравномерности силового поля в объеме заготовки. Однако необходимо отметить, что эффект снятия напряжений проявляется наиболее интенсивно в течение 2-3 часов после воздействия, затем напряжения связанные с объемами соизмеримыми с параметрами решетки, проявляются вновь.

Эксперименты проводились на экспериментальной оснастке предназначенной для обработки технологического процесса калибровки и управления свойствами материала тонкостенной оболочки сильфонов из 12X18H10T. Для хорошо электропроводных материалов возврат остаточных напряжений практически не наблюдался.

В результате анализа теоретических работ и экспериментальных исследований определены основные факторы, влияющие на свойства материалов при воздействии импульсных магнитных полей и токов, повышающие пластические свойства материала и управляющие последеформационным состоянием.

Полученные экспериментальные данные позволяют в плотную подойти к разработке математической модели, учесть влияние всех факторов магнитно-импульсного воздействия на металлы обрабатываемых деталей и ими управлять.

Практическое использование разработанной математической модели позволит определить оптимальные режимы воздействия импульсного магнитного поля и тока с целью управления свойствами материалов деталей.

Коэффициент полезного действия процесса индукционного нагрева при заданных парамет-

Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru.
Кирилин Александр Николаевич, доктор технических наук, Генеральный директор. E-mail: mail@samspace.ru.
Самохвалов Владимир Петрович, доктор технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru; bogdanovich@ssau.ru.
Вершигоров Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, офис – менеджер. E-mail: d0019@samspace.ru.
Паламарчук Юрий Ефимович, кандидат технических наук, начальник отдела 2612. E-mail: d612@samspace.ru.

рах определяется главным образом электрическим коэффициентом полезного действия (ЭКПД) системы цепь разряда - заготовка. Данный показатель может быть выражен как отношение приведенного активного сопротивления нагреваемой заготовки к эквивалентному сопротивлению системы.

Представим уравнение баланса энергии при МИОМ в виде

$$W = W_i + W_\varepsilon + W_k + W^1, \quad (1)$$

где W – полная энергия электрического поля, запасенная в конденсаторах; W_i – энергия, рассеиваемая в виде тепла на элементах разрядной цепи; W_ε – энергия, затрачиваемая на нагрев и воздействие на заготовку; W_k – энергия, рассеиваемая в диэлектрике конденсаторов; W^1 – энергия, определяемая остаточным зарядом конденсаторов.

Тогда W^1, W_k намного меньше W_i, W_ε . Следовательно,

$$W \approx W_i + W_\varepsilon = W_i + V \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (2)$$

Здесь V – объем нагреваемой заготовки; $\sigma(\varepsilon)$ – напряжение в материале заготовки; ε – относительная деформация.

Рассчитывается нагрев заготовки в зависимости от начальных параметров разрядной цепи при следующих допущениях: процесс нагрева носит адиабатический характер; удельное элек-

трическое сопротивление материала заготовки не зависят от тока разряда; краевыми эффектами пренебрегаем.

Возможно производить индукционный нагрев заготовок. Применение для нагрева специальных источников энергии высокой частоты, таких как ламповые, либо машинные генераторы, ионные и тиристорные преобразователи частоты, делает устройство в целом громоздким и дорогостоящим. Кроме того, частотный диапазон названных источников токов высокой частоты не всегда удовлетворяет оптимальным частотам нагрева цилиндрических заготовок.

В комбинированной установке (рис. 1) нагрев осуществляется импульсным индукционным генератором, собранным на базе основных элементов установки для магнитно-импульсного деформирования. Устройство отличается сравнительно простой схемой, высоким КПД генератора нагрева, а также имеет значительно улучшенные весогабаритные показатели.

Принцип работы установки заключается в следующем. Для нагрева заготовки общий емкостный накопитель (С) заряжается непосредственно от сети переменного тока через зарядный блок (ЗБГН), разряжается на заготовку (И) и через тиристорный коммутатор (В, ВУ), представляющий собой встречно-параллельное соединенные тиристор и неуправляемый вентиль.

В целях упрощения схемы и повышения КПД генератора зарядное устройство выполнено по бестрансформаторной схеме. Заряд накопителя производится от фазного напряжения

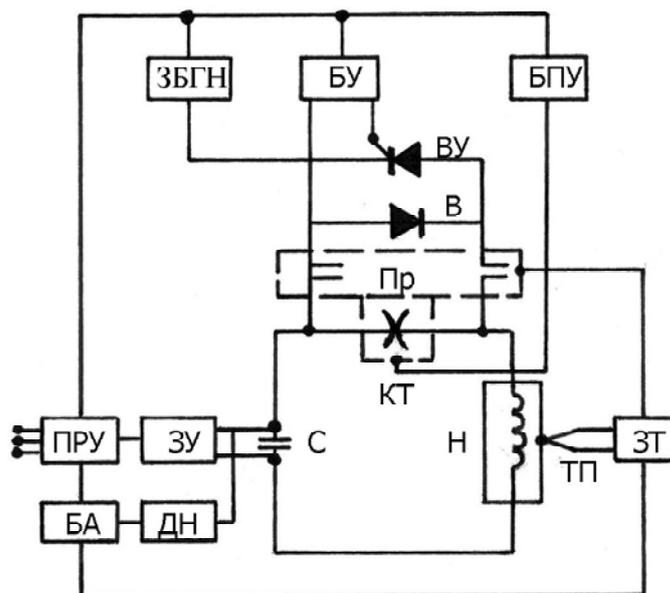


Рис. 1. Функциональная схема МИУ с нагревом обрабатываемых заготовок:

ПРУ – пуско-регулирующее устройство; ЗУ – зарядное устройство; БА – блок автоматики; ДН – делитель напряжения; ЗБГН – зарядный блок генератора нагрева; БПУ – блок поджигающего устройства; ЗТ – датчик температуры; КТ – коммутатор тригatron; ПР – переключатель режима; В, ВУ – вентильно-тиристорный коммутатор; ТП – термopapa

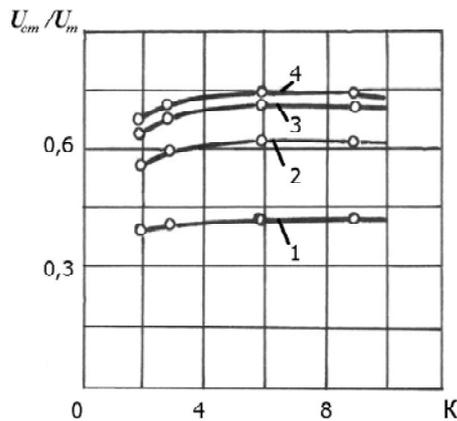


Рис. 2. Величина перенапряжения на накопителе при кратковременном воздействии на заготовку: 1 – 1X18H9T, 2 – ст20, 3 – Д16АТ, 4 – БрХ08. U_{cm} – напряжение на конденсаторе; U_m – бросок напряжения при первом импульсе; К – количество импу

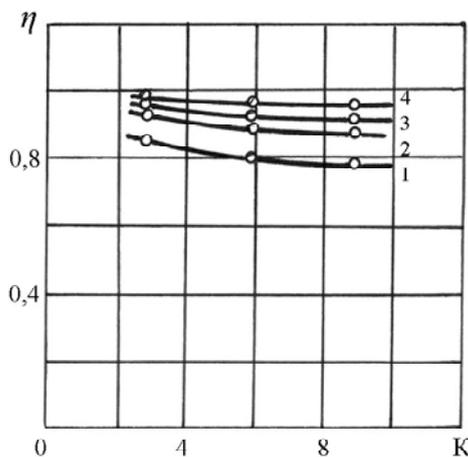


Рис. 4. Коэффициент полезного действия установки: 1 – 1X18H9T, 2 – ст20, 3 – Д16АТ, 4 – БрХ08

питающей сети через цепочку, содержащую последовательно включенные тиристор и дроссель. Максимальная мощность генератора достигается в результате использования максимального выброса напряжения на конденсаторе в переходном режиме, зависящего от начальной фазы подключения напряжения питания.

При отработке схемного решения конструкции устройства для воздействия на заготовок на базе магнитно-импульсной установки, проведены серии экспериментов по определению перенапряжения на накопителе, тока перегрузки на накопителе, КПД устройства при воздействии на материал заготовки и соотношение собственных частот колебаний конденсаторов и частот колебаний в разрядном контуре, т.е. контуре воздействия на заготовку.

Значения удельного сопротивления обрабатываемой детали оказывают влияние только на

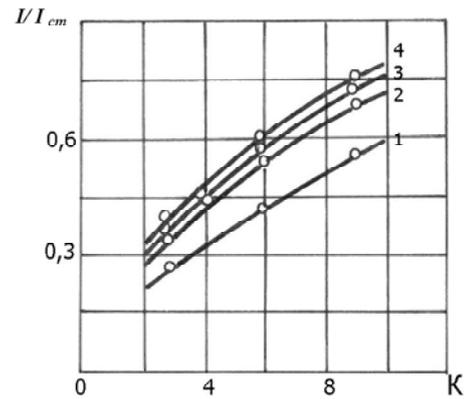


Рис. 3. Ток перегрузки в системе емкостного накопителя установки: 1 – 1X18H9T, 2 – ст20, 3 – Д16АТ, 4 – БрХ08. I_{cm} – предельный расчетный ток; I_m – ток разряда установки

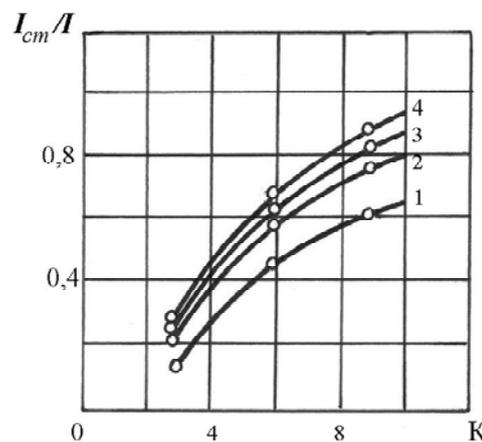


Рис. 5. Ток перегрузки в системе емкостного накопителя установки: 1 – 1X18H9T, 2 – ст20, 3 – Д16АТ, 4 – БрХ08. I_{cm} – предельный расчетный ток; I_m – ток разряда установки

величину перенапряжения. Испытание проводилось на материалах: 1X18H9T толщиной 0,5 мм; ст20 толщиной 1,2 мм; Д16АТ толщиной 1,0 мм; БрХ08 толщиной 0,8 мм.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что использование установки МИУ в качестве источника тока сопряжено с эксплуатацией конденсаторов в предкритическом режиме.

При использовании нагревательного устройства на базе установки была разработана методика расчета температуры заготовки.

Использование магнитно-импульсных деформирующих устройств в разрядной цепи показало, что воздействие тока перегрузки для аналогичных условий более жесткое (рис. 5).

В большинстве случаев процесс нагрева проводников можно считать адиабатическим, а распределение выделяемой энергии – равномерным до опре-

Таблица 1. Теплофизические параметры исследуемых материалов

Металл		Медь	Алюминий	Вольфрам	Железо
Плотность, 10^3 кг/м ³	Тверд.	8,8	2,7	19,26	7,84
	Жидк.	7,31	2,3	19,26	7,23
Удельная теплоемкость, Дж/кг-град.	Тверд.	430	880	142	460
	Жидк.	525	1080	240	790
Температура, °С	Плавл.	1083	660	3380	1585
	Испар.	2582	2330	6000	2800
Удельная теплота, 10^3 Дж/кг	Плавл.	206	395	184	270
	Испар.	4800	9210	4960	6300
Температурный коэффициент сопротивления, 10^{-3} 1/град	Тверд.	4,3	3,8	5,1	6,2
	Жидк.	0,37	0,95	-0,047	0,45

деленного момента по всему объему проводника.

Для расчета изменения удельного сопротивления проводника пользуются понятием “интеграл действия” (“интеграл тока”) – величиной

$\int j^2 dt$, где j - плотность тока. Процесс нагрева считается адиабатическим. В литературе имеются расчеты температуры и удельного сопротивления в области до температуры плавления и ориентировочные оценки при больших температурах.

Основной трудностью при расчетах являлось отсутствие надежных данных по теплофизическим параметрам исследуемых материалов. Из анализа литературных данных по теплофизическим константам при расчетах были приняты следующие данные, приведенные в табл. 1.

Расчет температуры удельного сопротивления проводился по фазам. До достижения температуры плавления с достаточно высокой точностью можно принять линейное изменение удельного сопротивления от температуры, и изменение температуры можно рассчитать по выражению:

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \left[\exp \left(\frac{\alpha \rho_0}{\gamma C} \int_0^t j^2 dt \right) - 1 \right], \quad (3)$$

а удельное сопротивление:

$$\rho = \rho_0 + \exp \left(\frac{\alpha \rho_0}{\gamma C} \int_0^t j^2 dt \right), \quad (4)$$

где T_0 – начальная температура, ρ_0 – удельное сопротивление при $T_0 = 0$, α – температурный коэффициент сопротивления, γ – плотность, C – удельная теплоемкость материала проводника.

С учетом значений теплофизических параметров, приведенных в таблице 1, построены зависимости температуры и удельного сопротивления от $\int j^2 dt$, приведенные на рис. 6, на кривых отмечены границы фазовых переходов.

При известном законе изменения тока во вре-

мени не представляет труда вычислить длительность отдельных стадий нагрева. Например, при постоянном токе время нагрева до температуры плавления

$$t_{nl} = \frac{\gamma C}{\alpha \rho_0 j^2} \ln [1 + \alpha (T_n - T_0)]. \quad (5)$$

При линейном изменении плотности тока с крутизной α можно записать аналогичные выражения:

$$t_{nl} = \sqrt[3]{\frac{\gamma C}{\alpha \rho_0 j^2} \ln [1 + \alpha (T_n - T_0)]}. \quad (6)$$

Приведенные выражения использовались при расчете параметров воздействия импульсного тока на заготовку от трансформатора сварочного оборудования.

Измерение количественных показателей влияния проходящего импульсного тока на структуру и свойства обрабатываемых металлов проводилось на основе метода электросопротивлений.

Как отмечается, электросопротивление является структурно-чувствительной характеристикой металлов. Для повышения чувствительности метода используется схема двойного моста, приведенная на рис. 7.

Обработанная деталь - сильфон R_x соединяется последовательно с деталью R_y , которая не обрабатывается и служит как эталонная. Проводник r вместе с контактным сопротивлением имеет минимальное значение.

Сопротивление R_1, R_2, R_3, R_4 выбираются намного больше сопротивления измеряемой детали. Составив уравнение токов для параллельных цепей, согласно закону Кирхгофа, получим:

$$R_x = R_y (R_1/R_3) + [r/(R_2 + R_4 + r)] [(R_1 R_4 - R_2 R_3)/R_3] \quad (7)$$

Подбирая сопротивления $R_1/R_2 = R_3/R_4$ получим $R_x/R_y = R_1/R_3$.

При известном значении источника Э.Д.С.

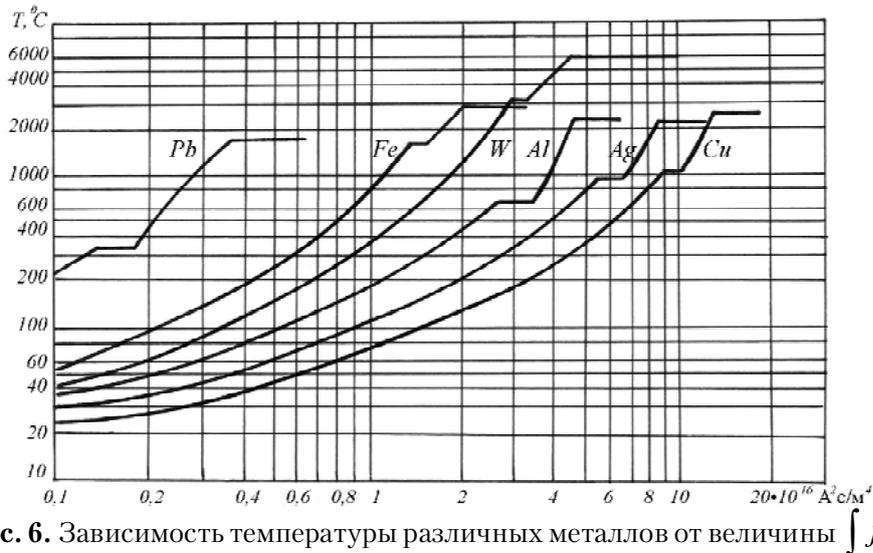


Рис. 6. Зависимость температуры различных металлов от величины $\int j^2 dt$

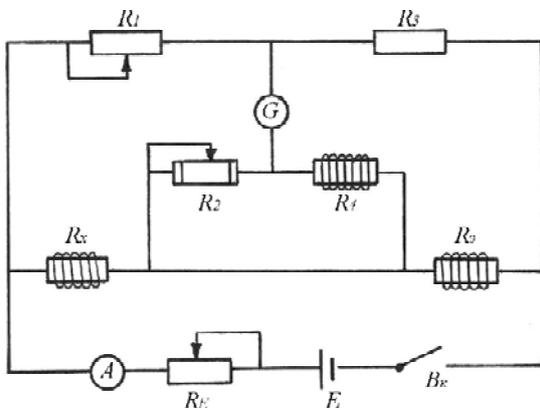


Рис. 7. Схема двойного моста для измерения сопротивления

напряжения “Е” и величине тока “А” в цепи определяем сопротивление обработанного сильфона.

Пластическая деформация, приводящая к наклепу приводит к увеличению электросопротивления на несколько процентов. Предварительная тестовая задача представлена на рис. 8.

Для эксперимента вырезались образцы из листа, деформировались в “гармошку” с высотой гофра равной высоте гофра сильфона и прово-

дилось измерение. В качестве эталонного сопротивления использовались недеформированные пластины.

Анализ данных показывает, что обработка импульсным магнитным полем и импульсным током создает возврат свойств металлов предшествующих рекристаллизации и полностью восстанавливает электросопротивление до исходного. В качестве тестовых измерений были выполнены работы для различных вариантов содержания углерода в стали при ее цементации и последующем отжиге (рис. 9).

По результатам проведенных экспериментов можно сделать заключение, что наибольшую эффективность воздействия можно получить при оптимальном использовании источника тока по схеме № 1. Однако совместное воздействие импульсного тока и импульсного магнитного поля позволяет получить эффекты снятия внутренних напряжений и воздействия на структуру материала, которое может быть описано градиентно-диффузной моделью. Работа по схеме вызывает сильные динамические нагрузки в разрядной

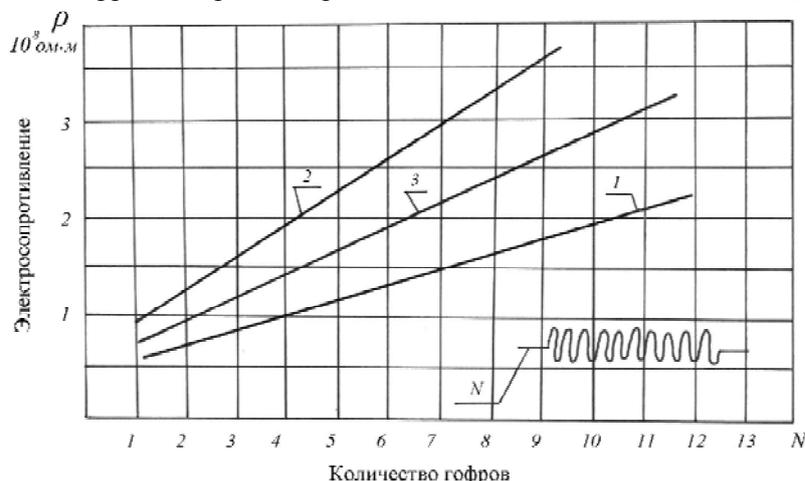


Рис. 8. Зависимость сопротивления образцов из различных материалов от величины наклепа: 1 – медь, 2 – алюминий, 3 – 12X18H10T

цепи установки и значительно сокращает ресурс работы конденсаторов. При работе по схеме можно сочетать деформационное воздействие от ИМП и энергетическое воздействие от импульсного тока. Основным недостатком при использовании ИТ является наличие зоны прижога в местах установки деталей в контактных элементах.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев С.П., Кухарь В.Д., Резников Л.А., Чибисов В.П. К выбору температурно-частотных режимов магнитно-импульсной штамповки с предварительным нагревом заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. 1985. № 12. С.10-15.
2. Юдаев В.Б., Авдюхин В.Е. Интенсификация процессов штамповки листовых деталей импульсным магнитным полем. Интенсивная технология обработки металлов давлением. М.: 1987. С.58-63.
3. Попов О.В., Власенков С.В., Таненберг Д.Ю. Перспективы использования электроимпульсного воздействия для интенсификации операций листовой штамповки. М.: ЦРДЗ, 1993. С. 18-20.
4. Самохвалов В.П., Барвинок В.А., Родин Н.П., Кирилин А.Н. Интенсивные технологические процессы магнитно-импульсной обработки металлов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1997. №1-2. С. 67-69.
5. Горлач Б.А. Математическое моделирование процессов формообразования неупругих тел. М.: МАИ, 1999. 215 с.

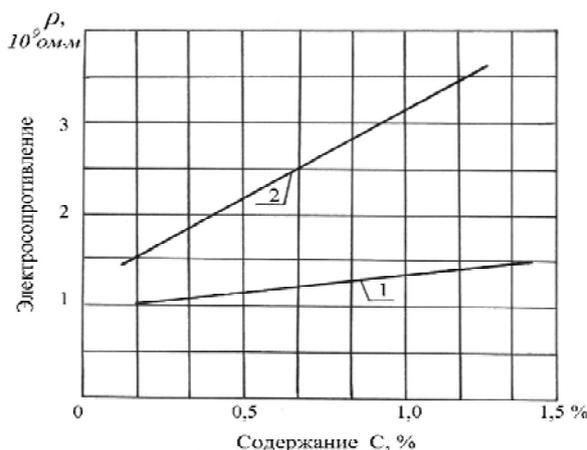


Рис. 9. Зависимость электросопротивления в стали от количества углерода: 1 – отжиг, 2 – цементирование

6. Кирилин А.Н., Барвинок В.А., Самохвалов В.П. Выбор математической модели технического процесса магнитно-импульсной обработки // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. № 4. С. 229-237.
7. Барвинок А.В., Кирилин А.Н., Самохвалов В.П. Магнитно-импульсная обработка деталей летательных аппаратов из труднодеформируемых материалов // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. № 2. С. 319-324.
8. Кирилин А.Н., Харитонов А.В., Паламарчук Ю.Е. Влияние параметров индукторных систем на качество деталей при магнитно-импульсной обработке // Известия Самарского научного центра РАН. Тематический выпуск "Актуальные проблемы проектирования, производства и эксплуатации изделий машиностроения". 2001. С. 158-162.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR DETERMINING OPTIMAL MODES OF THE IMPULSIVE MAGNETIC FIELD

© 2011 V.A.Barvinok¹, A.N. Kirilin², V.P. Samokhvalov¹, V.M. Vershigorov², Y.E. Palamarchuk²

¹Samara State Aerospace University

² State Research and Production Space-Rocket Center "TsSKB-Progress", Samara

In the spent work are executed theoretical and experimental researches on processing of managerial processes by post-deformation properties of a material of details for the purpose of improvement of their operational characteristics. The substantiation of a choice of a source of a pulse current is spent. Two variants are considered: processing by means of a pulse current direct transmission from magnetic-pulse installation; processing by impulses of a current from the welding transformer for dot contact welding. In the course of work designing and manufacturing of skilled equipment is executed and equipment selection is spent. Methods of definition of optimum modes of influence on preparations from various materials are developed. Key words: post-deformation properties, magnetic-impulsive field, residual stress, change of structure, thermal influence, magnetic influence.

Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru.

Alexander Kirillin, Doctor of Technics, Professor at the General director. E-mail: mail@samspace.ru.

Vladimir Samokhvalov, Doctor of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru.

Vyacheslav Vershigorov, Candidate of Technics, Office Manager. E-mail: d0019@samspace.ru.

Yuri Palamarchuk, Candidate of Technics, Department 2612 Head. E-mail: d612@samspace.ru.