

# СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ СЛОЖНОЙ НАГРУЗКИ, СОЗДАВАЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ В ВОДЕ, НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

Л.А. Каменская

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

## Введение

Во многих разрядно-импульсных технологиях электрический разряд в жидкости производится непосредственно на поверхность обрабатываемого изделия [1]. Примером могут служить процессы очистки отливок и снижения остаточных напряжений в сварных соединениях. В этих случаях на деталь действует сложная нагрузка, а именно: давление заполненной плазмой полости (канала разряда), образующейся при замыкании промежутка между электродом и поверхностью, и давление жидкости возмущённой расширяющейся полостью.

При теоретическом изучении напряженно-деформированного состояния (НДС) металлических изделий, обрабатываемых с помощью электрического разряда, необходимо знать степень влияния каждой из составляющих нагрузки на объект обработки.

В работе [2] было показано, что при импульсном воздействии на сварное соединение гидродинамической составляющей нагрузки можно пренебречь. В данной статье эта проблема рассматривается применительно к технологической операции очистки отливок электрогидроимпульсным (ЭГИ) способом.

Вопросу изменения НДС чугуновых отливок в процессе ЭГИ очистки посвящено достаточное количество работ, в частности [3–5], но они носят экспериментальный характер. Дорогостоящие эксперименты приходится повторять для каждого нового типа изделий, поэтому актуальным является теоретическое исследование, в данном случае – это проведение численного эксперимента.

Цель предлагаемой статьи – определить характеристики динамического деформирования обрабатываемого изделия с помощью численных методов и оценить влияние составляющих сложной нагрузки, создаваемой электрическим разрядом в воде.

Применяется тот же подход, что и в [2], – задача решается в несвязанной постановке – образец отливки в гидродинамической части считается абсолютно жесткой неограниченной плоской поверхностью, полученное при её решении давление на эту поверхность используется в качестве граничного условия в задаче упругопластического деформирования детали. Математическая постановка гидродинамической задачи и метод её решения приведены в [6].

## Динамическое деформирование чугуновой отливки под действием импульсной нагрузки

Объектом исследования взята чугуновая литая заготовка в виде параллелепипеда, размеры которого варьировались; предел прочности  $\sigma_B$  материала принят равным 250 МПа, предел текучести  $\sigma_T$  – 200 МПа. Исходное НДС образца определено как одноосное растяжение или сжатие по оси  $Ox$  (см. рис. 1) на основе следующих соображений. Даже при охлаждении простых отливок, например цилиндра или плиты, имеются тепловые различия между поверхностными и серединными слоями, что обуславливает возникновение неравномерных деформаций. В различных частях сложных изделий напряжения могут оставаться как сжимающими, так и растягивающими различной амплитуды [3]. Из-за большого количества факторов (марка материала, жесткость литейной формы, размеры и конфигурация детали и др.), влияющих на процесс кристаллизации материала отливки, величина внутренних напряжений в конкретной точке одинаковых отливок может меняться в широких пределах, что не позволяет на основе статистических данных прогнозировать поле напряжений в конкретной отливке. Анализ экспериментальных данных [3] показал, что максимальная величина остаточных  $\sigma_0$  напряжений в большей степени зависит от предела прочности материала. Если неизвестны остаточные напряжения в разных зонах, то они выбираются для всей отливки одинаковыми – от 0,41 до 0,82  $\sigma_B$  для различных марок чугуна или используется зависимость  $\sigma_0 / \sigma_B = k \cdot \sigma_B - 0,03$ , где  $k = 0,0021$  МПа.

Предполагалось, что до обработки объект находится в состоянии покоя, одна из его граней

является жесткой и неподвижной, а на противоположащую ей грань, в её центре, производился электрический разряд, создающий нагрузку на эту поверхность. Было принято, что импульсное воздействие направлено по нормали к оси распределения исходных внутренних напряжений. Остальные поверхности образца считались свободными от нагрузки.

Форма заготовки и расположение электрода при моделировании могут быть другими согласно требованиям технологии. Схема нагружения образца приведена на рис. 1.

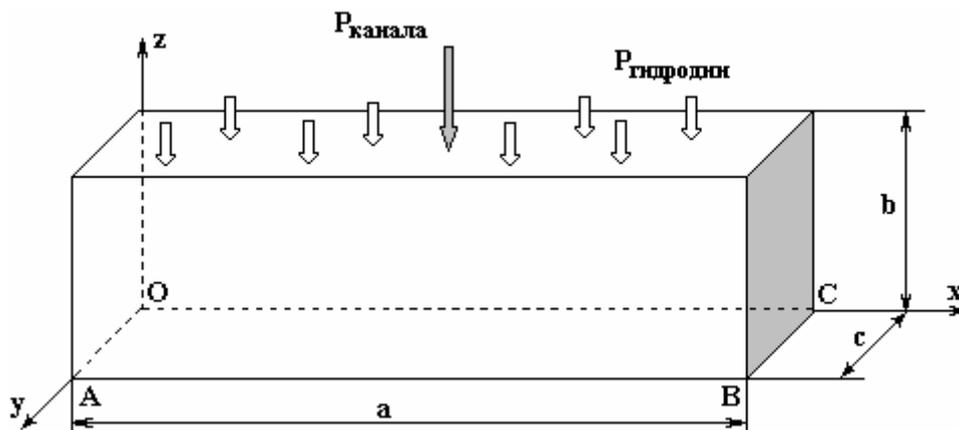


Рис. 1. Схема нагружения образца отливки

Приведем математическую постановку задачи.

Динамические процессы в изучаемом образце описывались уравнениями движения сплошной среды и соотношениями, связывающими деформации и напряжения [2, 7]:

$$\rho \dot{u}_x = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z};$$

$$\rho u_y = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z};$$

$$\rho \dot{u}_z = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z};$$

$$\dot{S}_{ij} = 2G(\dot{\varepsilon}_{ij} - 1/3 \dot{\varepsilon} \cdot \delta_{ij}); \quad \sigma_{ij} = S_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij}; \quad \dot{\sigma} = -K \cdot \dot{\varepsilon}.$$

Здесь  $\rho$  – плотность материала;  $u_x, u_y, u_z$  – составляющие вектора скорости;  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $S_{ij}$  – девиатор напряжений;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера ( $i, j = x, y, z$ ),  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ;  $G$  – модуль сдвига;  $\sigma$  – среднее напряжение;  $\varepsilon$  – объёмная деформация;  $K$  – модуль объёмного сжатия. Точки над символами обозначают операцию дифференцирования по времени.

Начальными условиями считались характеристики исходного деформированного состояния отливки.

На неподвижной грани OABC (см. рис. 1) задавались условия равенства нулю нормальной составляющей скорости. На нагружаемой поверхности соответствующие нормальные напряжения равны давлению, распределение которого по этой поверхности во времени взято из решения гидродинамической задачи, на свободных от нагрузки гранях – нулю.

#### Результаты решения задачи

Результаты численного исследования изменения и стабилизации внутренних напряжений литой заготовки получены при нагружении её давлением, взятым из решения гидродинамической задачи [2] для одного из режимов. Временные зависимости давления в канале разряда (кривая 1) и давления жидкости на обрабатываемую поверхность на нескольких расстояниях от оси канала (0,01 м – кривая 2, 0,025 м – кривая 3, 0,05 м – кривая 4) приведены на рис. 2. В процессе расчетов фиксировались значения напряжений и деформаций во всем объеме образца.

Один из рассматриваемых образцов (№ 1) – брусок с квадратным поперечным сечением  $b=c=10$  мм и длиной  $a=100$  мм, другой (№ 2) – пластина толщиной  $b=6$  мм и равными сторонами  $a=c=100$  мм. Остальные две заготовки имели размеры: № 3 –  $a=100$  мм,  $b=300$  мм,  $c=300$  мм и № 4 –  $a=200$  мм,  $b=60$  мм,  $c=100$  мм.

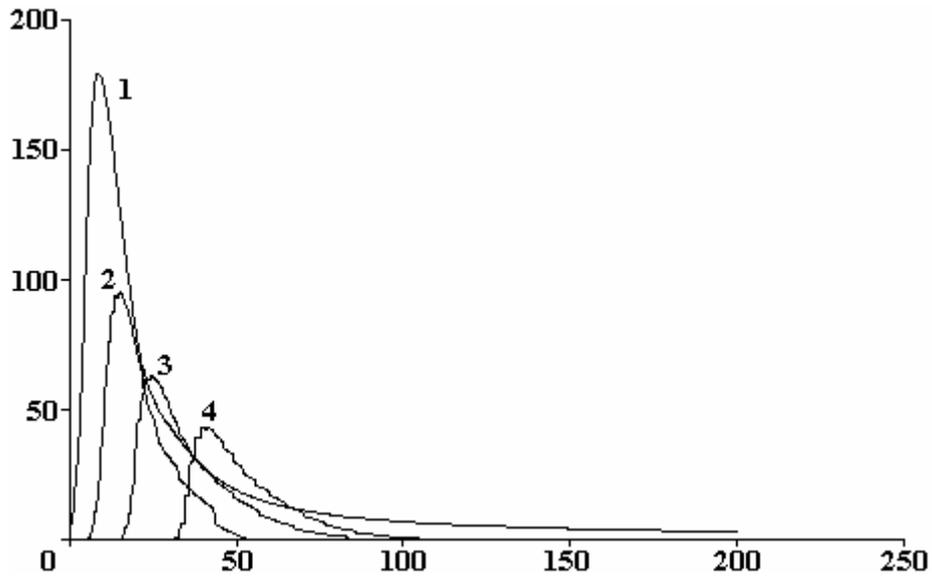


Рис. 2. Давление в канале разряда (1) и давление жидкости на поверхность пластины на расстоянии 0,01 м (2), 0,025 м (3) и 0,05 м (4) от оси симметрии канала разряда

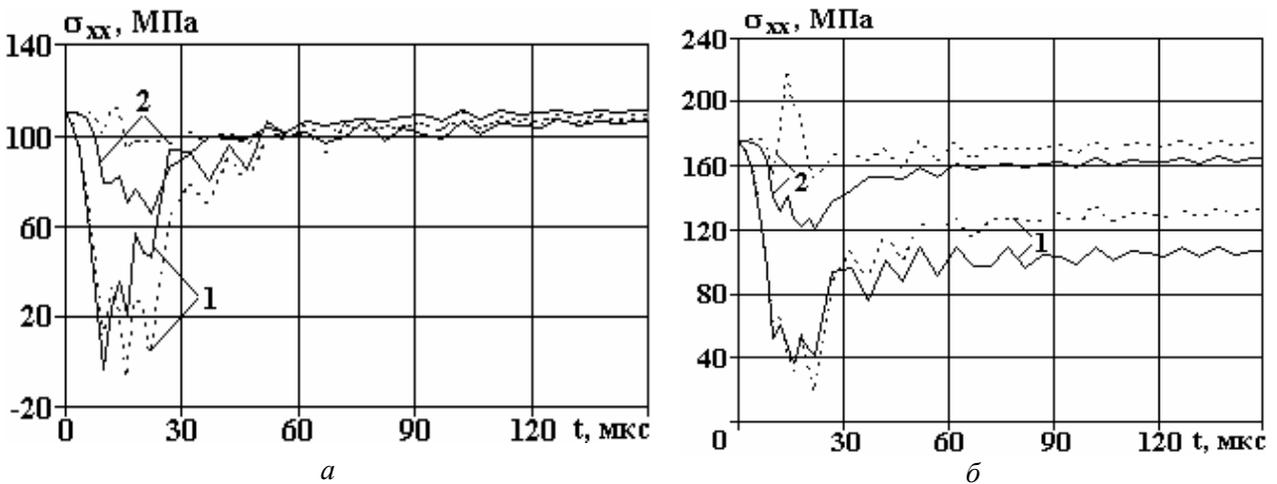


Рис. 3. Нормальные продольные напряжения для образца № 1:

*a* – при  $\sigma_0 = 0,44 \sigma_B$ ; *б* – при  $\sigma_0 = 0,7 \sigma_B$

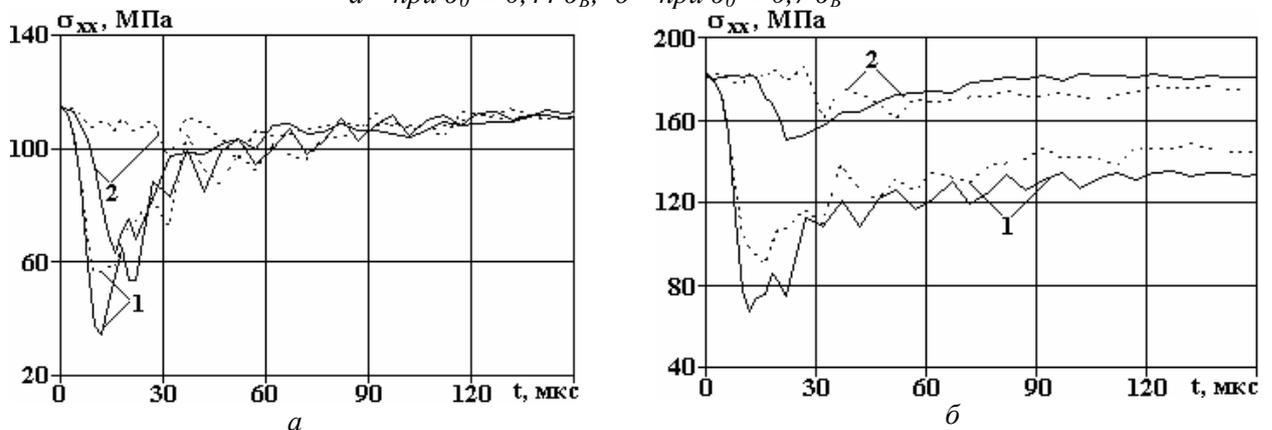


Рис. 4. Нормальные продольные напряжения для образца № 2:

*a* – при  $\sigma_0 = 0,44 \sigma_B$ ; *б* – при  $\sigma_0 = 0,7 \sigma_B$

Изменение НДС отливки оценивалось по наибольшим напряжениям; для заданной схемы это нормальные составляющие напряжений, ориентированные либо по оси растяжения-сжатия в исходном состоянии, либо по оси, совпадающей с направлением нагрузки – осью канала электрического разряда. На рис. 3–6 даны зависимости изменения во времени до их стабилизации продольных нормальных напряжений  $\sigma_{xx}$  для четырёх образцов, отличавшихся своими размерами и начальным распределением внутренних напряжений. Рис. 3,а–б,а соответствуют исходному растяжению образца до  $0,44\sigma_B$ , а рис. 3,б–б,б – до  $0,7\sigma_B$ . На всех рисунках сплошными кривыми представлены результаты, полученные с учетом сложной нагрузки, включающей как давление канала разряда, так и гидродинамическое, а штриховыми – без учета гидродинамической составляющей нагрузки.

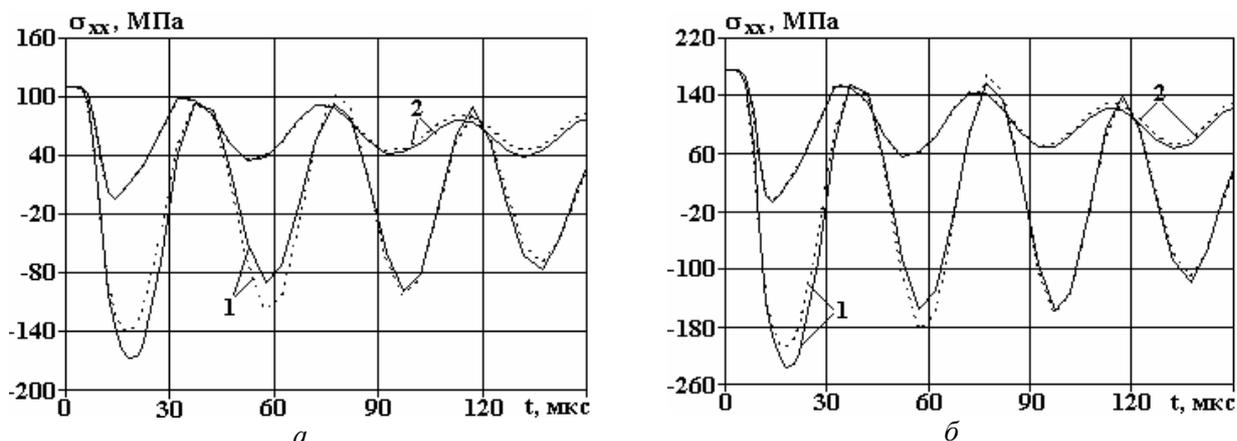


Рис. 5. Нормальные продольные напряжения для образца № 3:  
а – при  $\sigma_0 = 0,44 \sigma_B$ ; б – при  $\sigma_0 = 0,7 \sigma_B$

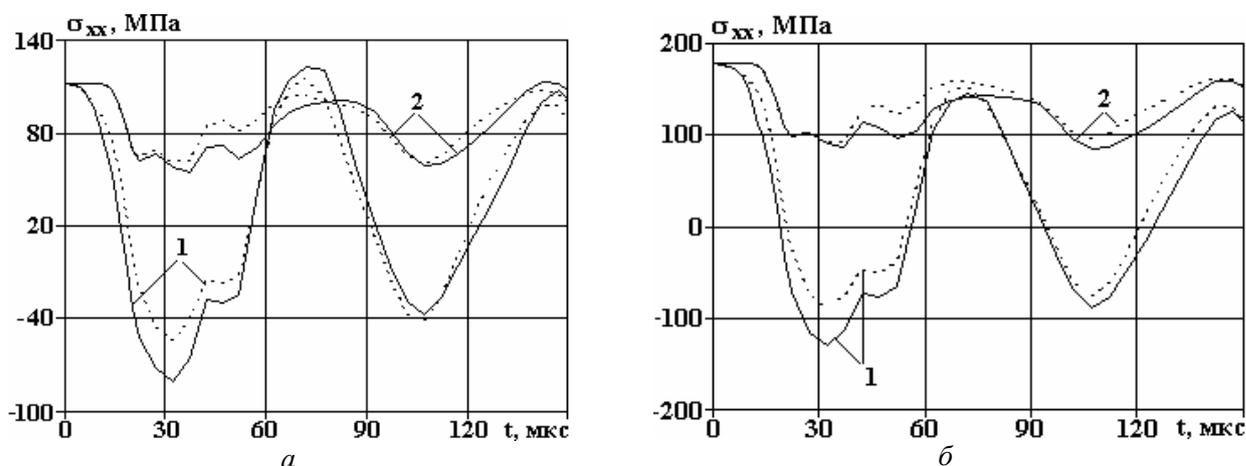


Рис. 6. Нормальные продольные напряжения для образца № 4:  
а – при  $\sigma_0 = 0,44 \sigma_B$ ; б – при  $\sigma_0 = 0,7 \sigma_B$

Для анализа выбраны две характерные точки образца: в области, где в процессе обработки исходные остаточные напряжения  $\sigma_0$  снизились в наибольшей степени (во всех случаях – это центр нагружаемой грани, кривые 1 на всех рисунках), и в области, где они остались практически на том же уровне или снизились незначительно (кривые 2). В образцах типа бруска и пластины наблюдалось кратковременное повышение продольных напряжений, достигавших в отдельных случаях уровня пластических деформаций. В двух других заготовках (№ 3 и 4) разгрузка происходит почти до нулевых значений напряжений  $\sigma_{xx}$  с их колебаниями от растягивающих до сжимающих с амплитудой  $\sim 100$  МПа.

Для одного из образцов, все три размера которого соизмеримы между собой (№ 3), приведены поперечные нормальные напряжения  $\sigma_{zz}$  (рис. 7,а соответствует  $\sigma_0 = 0,44\sigma_B$ , а рис. 7,б –  $\sigma_0 = 0,7\sigma_B$ ). Сплошные и штриховые кривые имеют тот же смысл, что и для зависимостей  $\sigma_{xx}$ . В этом образце и образце № 4 напряжения  $\sigma_{zz}$  ведут себя одинаково – периодически меняют знак, достигая величин порядка  $0,5\sigma_T$  для № 3 и  $0,25\sigma_T$  – для № 4, и выходят в состоянии равновесия практи-

чески на нулевой уровень. В заготовках типа бруска и пластины эти напряжения в процессе установления равновесия изменяются мало.

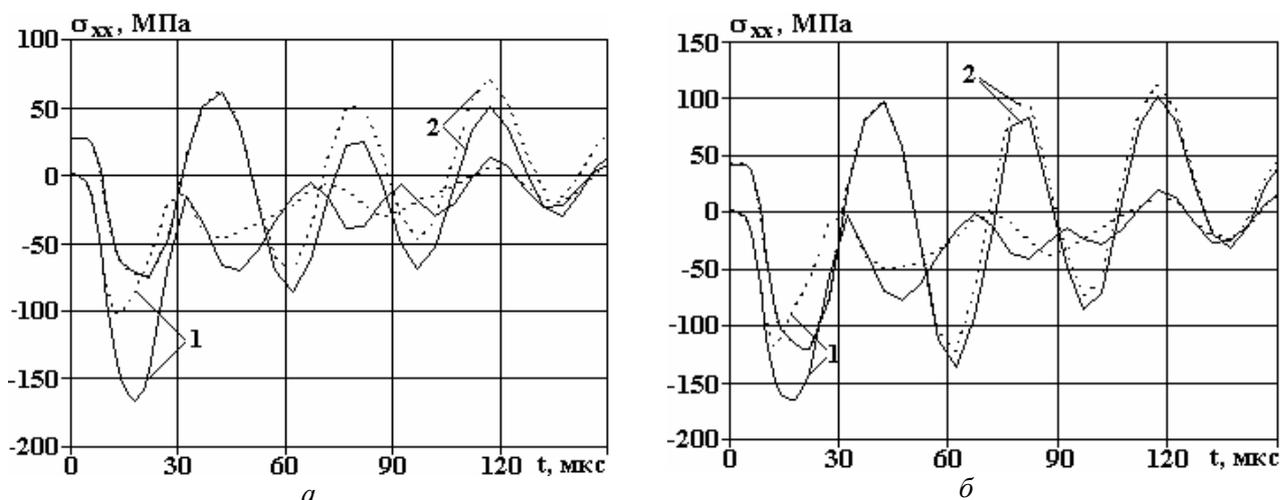


Рис. 7. Нормальные поперечные напряжения для образца № 3:  
 а – при  $\sigma_0 = 0,44 \sigma_B$ ; б – при  $\sigma_0 = 0,7 \sigma_B$

Из приведенных рисунков видно, что кривые соответствующих напряжений, полученные с учетом полной нагрузки и без учета гидродинамической нагрузки, отличаются незначительно (не более 30%).

#### Выводы

При численном исследовании напряженно-деформированного состояния чугунных отливок с использованием приведенной в работе математической модели можно пренебречь влиянием гидродинамической составляющей нагрузки на поверхность изделия. Следует учитывать составляющую, создаваемую каналом подводного электрического разряда, поскольку она существенно больше влияет на упругопластическое деформирование изделия.

*Автор выражает благодарность Г.А. Барбашовой за участие в обсуждении целей работы и её результатов, а также сделанные замечания.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наук. думка, 1990. 208 с.
2. Barbashova G.A., Kamenskaya L.A. Influence of load due to electric discharge channel in water and hydrodynamic load on stressed-strained state of joint weld. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007, **43**(3), 169–171.
3. Горенко В.Г., Приходько В.В. Бинарный процесс выбивки стержней и стабилизации геометрической точности отливок с использованием электрогидроимпульсного эффекта. *Металл и литьё Украины*. 1994, (3), 16–18.
4. Вершинин В.В., Дмитров И.С., Грудо А.И. Использование электрогидравлической обработки для снижения остаточных напряжений и стабилизации размеров чугунных отливок. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1991, (10), 35–36.
5. Петрусенко С.А., Радько С.М. Расчет основных параметров процесса старения электрогидравлическим нагружением чугунных корпусных деталей. *Литейное производство*. 1986, (5), 14–16.
6. Барбашова Г.А., Половинко В.Д., Юрченко Е.С. Влияние параметров импульса давления на снижение остаточных напряжений. *Электронная обработка материалов*. 2006, **42**(4), 60–64.
7. Уилкинс М.Л. *Расчёт упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике*. М.: Мир, 1967. С. 212–263.

*Поступила 01.11.10*

#### Summary

The deflected mode of the iron casting at the impact of the electric discharge in the water on surface of metal work is studied with the help of the numerical methods. It's defined that the load, produced by the channel of the electric discharge has effect on the change of the metal work deflected mode the much more than the hydrodynamic load.