

Г. О. АНИЩЕНКО, В. І. КОНОХОВ, Д. В. ЛАВІНСЬКИЙ

ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ У ПРИЛАДАХ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Розглядається проблема аналізу нестационарного тепловиділення внаслідок протікання електричного струму у пристроях для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. Аналіз доступних джерел інформації дозволив зробити висновок, що велика кількість досліджень у цій галузі присвячено вивченню процесів теплопередачі при технологічних операціях індукційного нагріву. При інших технологічних операціях магнітно-імпульсної обробки матеріалів тепловиділення також є значним. Нестационарне неоднорідне температурне поле може призводити до виникнення значних температурних деформацій. Це, у свою чергу, може спричинити втрату працездатності приладу внаслідок руйнування чи необоротного деформування. Адекватне моделювання нестационарного поширення температури у разі є обов'язковим етапом під час проведення розрахункового аналізу у процесі проектування технологічних приладів. Запропоновано загальну стратегію визначення поширення нестационарного температурного поля за наявності нестационарного неоднорідного електромагнітного поля. Запропонована стратегія передбачає загальне розв'язання задач про поширення електромагнітного поля та температурного поля в рамках єдиної розрахункової схеми. Як чисельний метод запропоновано використання методу кінцевих елементів. Метод кінцевих елементів при використанні в подібних задачах дозволяє складати ітераційні процедури, за допомогою яких можна враховувати нелінійні ефекти, пов'язані з впливом температури на електрофізичні властивості матеріалів. Розглянуто завдання послідовного визначення нестационарного, неоднорідного електромагнітного поля та нестационарного температурного поля у складових матрицях, призначених для електромагнітного пресування порошків надміцних тугоплавких матеріалів. Наведено розподіл деяких кількісних характеристик електромагнітного поля, а також залежність температури від часу.

Ключові слова: температурне поле, нестационарна теплопровідність, електромагнітне поле, магнітно-імпульсна обробка матеріалів, метод скінчених елементів.

The problem of analysis of non-stationary heat generation due to the flow of electric current in devices for magnetic-pulse processing of materials is considered. An analysis of the available information sources led to the conclusion that a large number of studies in this area are devoted to the study of heat transfer processes during technological operations of induction heating. In other technological operations of magnetic-pulse processing of materials, heat release is also significant. In this case, a non-stationary inhomogeneous temperature field can lead to significant temperature deformations. This, in turn, can cause a loss in the performance of the device due to destruction or irreversible deformation. Adequate modeling of non-stationary temperature propagation in this case is an obligatory step in carrying out computational analysis in the process of designing technological devices. A general strategy is proposed for determining the propagation of a non-stationary temperature field in the presence of a non-stationary non-uniform electromagnetic field. The proposed strategy presupposes a general solution of the problems of the propagation of the electromagnetic field and the temperature field within the framework of a unified design scheme. The use of the finite element method is proposed as a numerical method. The finite element method, when used in such problems, allows one to draw up iterative procedures that can be used to take into account the nonlinear effects associated with the influence of temperature on the electro-physical properties of materials. The problem of sequential determination of a non-stationary, non-uniform electromagnetic field and a non-stationary temperature field in composite matrices intended for electromagnetic pressing of powders of super-strong refractory materials is considered. The distribution of some quantitative characteristics of the electromagnetic field, as well as the dependence of temperature on time are presented.

Keywords: temperature field, transient heat transferring, electromagnetic field, magnetic-pulse processing of materials, finite element method.

Вступ. Енергія електромагнітного поля (ЕМП) використовується у багатьох технологічних операціях та впливає на функціонування різноманітних технічних систем. Серед іншого дія ЕМП на електропровідне тіло проявляється у виникненні розподілених джерел тепловиділення (згідно до закону Джоуля-Ленца), які призводять до змін у температурному полі (ТП) тіла. Докладно питання визначення ТП за подібних умов досліджені стосовно технологічних операцій індукційного нагріву. Індукційний нагрів застосовується з метою використання у при різноманітних технологічних операціях. За його допомогою можна змінювати механічні характеристики електропровідного матеріалу, впливати на рівні залишкових напружень, проводити розмонтажування різноманітних з'єднань тощо.

Відзначимо, що ТП, яке змінюється завдяки протіканню електричного струму під час інших технологічних операцій, які використовують енергію ЕМП, може значним чином впливати на розподіл компонентів напружено-деформованого стану (НДС). Визначення НДС технологічних приладів з метою прогнозування їх працездатності є особливо важливим у випадку магнітно-імпульсної обробки матеріалів (МІОМ), де переважним чином використовується

силовий вплив ЕМП. Також зміни у ТП можуть впливати й на процеси деформування заготовок.

Для адекватного аналізу НДС приладів МІОМ необхідно вивчення та дослідження усіх факторів, які можуть впливати на процеси деформування. Таким чином, створення методів аналізу розповсюдження ТП у елементах технологічних приладів, підданих дії ЕМП є актуальною науково-практичною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основні положення, особливості створення систем індукційного нагріву та методи аналізу розповсюдження ТП у даному випадку наведені у роботах [1-4]. Тут докладно вивчені питання стосовно конструкцій приладів, які генерують високочастотні ЕМП. Велика увага зосереджена на питаннях визначення просторово-часових розподілів ТП під час технологічних операцій індукційного нагріву. Визначено, що адекватний аналіз ТП у даному випадку можливий лише на основі попереднього визначення просторово-часових розподілів основних кількісних характеристик ЕМП.

Основи застосування енергії ЕМП для технологічних операцій МІОМ викладені у фундаментальній роботі [5]. Сучасний стан розвитку

технологічних операцій МІОМ та накопичений досвід їх розробок висвітлені у оглядовій статті [6].

Питання розробки індукторних систем нетрадиційного спрямування висвітлені у статтях [7,8].

Відзначимо, що роботи, присвячені розробці приладів МІОМ, практично не торкаються питань визначення ТП під час технологічних операцій МІОМ та питань їх впливу на процеси деформування. Проте, можна зробити однозначний висновок, що аналіз ТП потребує попереднього визначення розповсюдження ЕМП у елементах технологічних приладів та заготовок, причому аналіз повинен проводитись для одних й тих самих розрахункових схем.

Для визначення розподілу ЕМП використовуються різноманітні підходи та методи. Великий спектр задач розв'язується аналітичними методами на базі інтегральних перетворень Лапласа [1-8]. Відзначимо, що у цьому випадку великі труднощі виникають при створенні розрахункових схем, оскільки аналітичні підходи можуть застосовуватись лише для тіл канонічної форми.

Натомість використання чисельних методів практично позбавлене необхідності значно спрощувати розрахункові схеми у порівнянні із реальністю. Докладне висвітлення особливостей застосування чисельних методів для аналізу розповсюдження ЕМП наведено у монографії [9]. Тут представлені можливості застосування методу скінчених різниць, методу вторинних джерел, методу граничних інтегральних рівнянь.

Проте, на сучасному етапі розвитку розрахункових підходів до аналізу ЕМП, ТП та НДС можна відзначити, що найбільш зручним є використання методу скінчених елементів (МСЕ). Однією з головних переваг МСЕ у порівнянні із аналітичними методами та іншими чисельними методами є те, що він практично позбавлений обмежень при створенні розрахункових схем. Це стосується як питань геометрії реальних об'єктів, так і питань адекватного моделювання граничних умов, особливостей поведінки матеріалу тощо. Проблеми, які виникають при врахуванні нелінійностей різної природи, можуть бути вирішені завдяки створенню відповідних ітераційних процедур. Також відзначимо, що при використанні МСЕ, визначення розподілів ЕМП, ТП та НДС проводиться для однієї розрахункової моделі. Точність розв'язань МСЕ може коригуватись розмірами скінченно-елементних сіток, при сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки практично не має обмежень на кількість скінчених елементів розрахункової схеми. Можливості застосування МСЕ для аналізу деформування заготовок під час МІОМ представлені у роботі [10].

Мета статті. Стаття безпосередньо присвячена питанням визначення просторово-часових розподілів ЕМП та ТП у обладнанні при сумісному пресуванні порошків надміцних тугоплавких матеріалів у складених прес-формах з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів (ВВКМ) [11].

Використання складених матриць з ВВКМ дозволяє досягати при традиційному ізостатичному пресуванні тисків порядку 100 МПа. Подальше збільшення зусиль пресування може призводити до руйнування обладнання [12].

Збільшити безпечним чином зусилля пресування можна, якщо застосовувати додатково електромагнітне пресування завдяки зовнішньому спіральному індуктору (рис. 1).

Можливості застосування енергії ЕМП для пресування порошкових матеріалів наведені у роботах [13,14].

Аналіз результатів. Розглянемо розрахункову схему прес-форми із зовнішнім індуктором, яка може мати вигляд, наведений на рис. 1. В даному випадку електромагнітні сили, що розвиваються індуктором, будуть спрямовані до осі Oz вздовж радіуса. Зовнішній спіральний багатовитковий індуктор з ізоляцією на основі азбесту, струмопровід – з міді. Товщина ізоляції індуктора – $H = 8$ мм, переріз струмопроводу – прямокутник 3 на 4 мм. Кількість витків струмопроводу варіюється. Прес-форма має такі розміри: $d_1 = 340$ мм, $d_3 = 340$ мм, $L = 340$ мм. Вироби можуть мати різну висоту (l), яка задається відносно висоти прес-форми (L). Навантаженість вкладиша і матриці залежить від співвідношення їх товстостінностей, які можна визначити відношенням зовнішнього діаметра вкладиша (d_2) до зовнішнього діаметра матриці (d_3) при фіксованому діаметрі пресованого виробу (d_1). Розрахунки проводились для співвідношень: $l/L = 0,550$ та $d_2/d_3 = 0,850$. Необхідно визначити нестационарне ТП, яке виникає у індукторі та матриці завдяки генеруванню ЕМП.

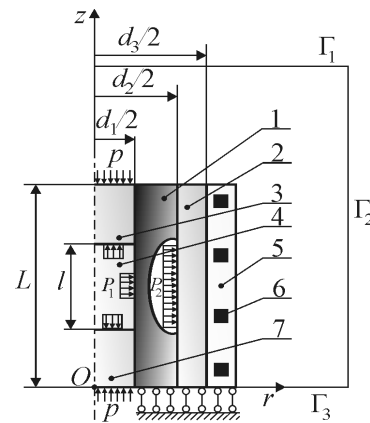


Рис. 1 – Розрахункова схема пристрою з індуктором для пресування порожнистих виробів з порошків: 1 – вкладиш; 2 – матриця; 3,7 – пуанسونи; 4 – брикет з порошку; 5 – ізоляція індуктора; 6 – струмопровід індуктора

Розв'язання поставленої задачі повинне виконуватись у два етапи: визначення просторово-часових розподілів ЕМП та визначення нестационарного ТП (у припущенні, що температура не впливає на електрофізичні властивості матеріалів матриці та індуктора).

Основні співвідношення для визначення кількісних характеристик ЕМП та НДС наведені у статті [19]. Відзначимо, що при визначенні розподілу ЕМП матриця розглядалась оточеною повітряним середовищем, на границях якого (Γ_i) задавалась рівність нулю векторного магнітного потенціалу (затухання ЕМП). В якості джерела поля приймався струм, рівномірно розподілений по перетину витка струмопроводу, в часі густина струму приймалася за законом:

$$j(t) = I_m e^{-\delta^2 \pi^2 t} \cdot \sin(2\pi f t),$$

де амплітуда сили струму

$$I_m = 30 \text{ кА},$$

частота

$$f = 2 \text{ кГц},$$

відносний коефіцієнт загасання

$$\delta = 0,3.$$

При визначенні нестационарного ТП повітряне середовище не розглядалась, а на зовнішніх поверхнях матриці та індуктора задавались умови конвекційного теплообміну із сталим коефіцієнтом.

Далі розглянемо безпосередньо деякі результати розрахунків. На рис. 2 наведені розподіли дотичної компоненти напруженості магнітного поля по бічній поверхні розділу поміж матрицею та вкладишем в залежності від кількості витків струмопроводу. Рис. 3 ілюструє зміну у часі температури у витку струмопроводу. Потрібно відзначити, що температура струмопроводу монотонно зростає з плином часу, а високі термоізоляційні властивості азбесту перешкоджають відведенню тепла, відповідно, при безперервній роботі індуктора температура струмопроводу може досягти рівнів температури плавлення міді. Даний факт вимагає введення до технологічної системи відповідних охолоджувальних елементів.

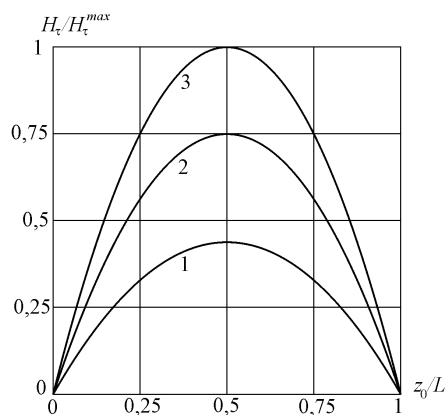


Рис. 2 – Розподіл дотичної складової напруженості магнітного поля уздовж внутрішньої поверхні вкладиша при різній кількості витків струмопроводу індуктора; 1 – три витка, 2 – 6 витків, 3 – 9 витків

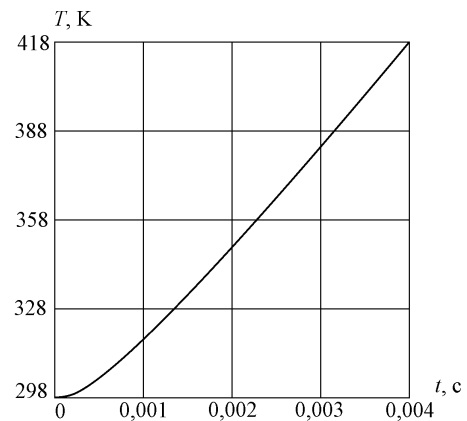


Рис. 3 – Залежність температури від часу у центрі перерізу витка струмопроводу

Висновки. У роботі розглянуті питання аналізу нестационарних температурних полів у приладах для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. Визначена загальна розрахункова стратегія, яка передбачає використання методу скінченних елементів для розв'язання двох задач: визначення розподілу електромагнітного поля та нестационарного теплового поля. Дана стратегія проілюстрована на прикладі стосовно аналізу складеної прес-форми та спірального індуктора для пресування порошків. Подальший розвиток висвітленої проблеми полягає в уточненому аналізі з урахуванням охолоджувальних елементів.

Список літератури

1. *Pantelyat M. G.* Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals / *M. G. Pantelyat, M. Féliachi* // *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2002. – no. 1 (17). – P. 29–33. <https://doi.org/10.1051/epiap:2001001>
2. *Herlach F.* Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications / *Herlach F.* // *Berlin*. – 1985. – Vol. 57. – 367 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
3. *Кувалдин А. Б.* Застосування низькотемпературного індукційного нагріву для вивантаження змерзлого вугілля з металевих напіввагонів / *А. Б. Кувалдин, Б. В. Кільців* // *Праці МЕІ*. – 1978. – Вип. 370. – С. 86–89.
4. *Doležel I.* Continual induction hardening of axi-symmetric bodies / *I. Doležel, J. Barglik, B. Ulrych* // *Journal of materials processing technology*. – 2005. – vol. 161. – no. 1–2. P. 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.035>
5. *Білий І. В.* Довідник з магнітно-імпульсної обробки металів / *И. В. Білий, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко* // *Харків*. – 1977. – 188 с.
6. *Psyk V.* Electromagnetic forming – a review / *V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – vol. 211. – no. 5. – P. 787–829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
7. *Batygin Y. V.* Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications / *Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – vol. 213. – no. 3. – P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
8. *Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V.* Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / *Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – vol. 214. – no. 2. – P. 390–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
9. *Подільців А. Д.* Елементи теорії та чисельного розрахунку електромагнітних процесів у провідних середовищах / *А. Д. Подільців, І. Н. Кучерява* // *Київ*. – 1999. – 362 с.
10. *Stierner M.* Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electro-

- magnetic metal forming / M. Stiemer, J. Unger, B. Svendsen, H. Blum // International journal for numerical methods in engineering. – 2006. – no. 68 (13). – P. 1301–1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
11. Бушувєв Ю. Г. Вуглецо-вуглецеві композиційні матеріали / Ю. Г. Бушувєв, М. І. Персин, В. А. Соколов // М.: Металлургия. – 1994. – 128с.
 12. Ашихмін В. П. Аналіз міцності елементів прес-форм із вуглець-вуглецевих матеріалів для псевдоізостатичного пресування / В. П. Ашихмін, О. В. Бірюков, В. А. Гурін, Б. Б. Затолока, В. В. Колосенко, С. Ю. Сасенко, О. К. Морачковський, Д. В. Лавінський // Питання атомної науки та техніки. Серія: Фізика радіаційних пошкоджень та радіаційне матеріалознавство. – 2007. – № 6 (91). – С. 120–123.
 13. Sandstrom D. J. Consolidating metal powders magnetically / D.J. Sandstrom // Metal. Progr. – 1964. – vol. 86. – no 3. – P. 215–221.
 14. Mamalis A. G. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments / A. G. Mamalis, D. E. Manolakas, A. G. Kladas, A. K. Koumoutsos // Applied Mechanics Reviews. – 2004. – vol. 57. – no. 4. – P. 299–324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>
 15. Altenbach H. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields / H. Altenbach, O. Morachkovsky, K. Naumenko, D. Lavinsky // Continuum Mechanics and Thermodynamic. – 2016. – vol. 28. – no. 5. – P. 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0484-8>
- References (transliterated)**
1. Pantelyat M. G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals. *The European Physical Journal Applied Physics*. 2002, – no. 1 (17), pp. 29–33. <https://doi.org/10.1051/epjap:2001001>
 2. Herlach F. *Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications*. Berlin, 1985. Vol. 57. 367 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
 3. Kuvaldin A. B., Kol'tsov B. V. Primeneniye nizkotemperaturnogo induktsionnogo nagreva dlya vygruzki smerzhshikhnya ugley iz metallicheskih poluvagonov. [Application of low-temperature induction heating for unloading frozen coals from metal gondola cars.] *Trudy MEI: Proceedings of the MEI*. 1978, Vyp. 370. pp. 86–89.
 4. Doležel I., Barglik J., Ulrych B. Continual induction hardening of axi-symmetric bodies. *Journal of materials processing technology*. 2005, vol. 161, no. 1–2, pp. 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.035>
 5. Belyy I. V., Fertik S. M., Khimenko L. T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoy obrabotke metallov*. [Handbook on magnetic-pulse processing of metals.] Kharkov, 1977. 188 p.
 6. Psyk V., Risch D., Kinsey B. L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Electromagnetic forming – a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 5, pp. 787–829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
 7. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals–fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, vol. 213, no. 3, pp. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
 8. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 2, pp. 390–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
 9. Podol'cev A. D., Kucheryavaya I. N. Elementy teorii i chislennogo analiza elektromagnitnykh processov v provodyaschikh sredakh [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in conducting media]. Kiev, 1999. 362 p.
 10. Stiemer M., Unger J., Svendsen B., Blum H. Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. *International journal for numerical methods in engineering*. 2006, no. 68 (13), pp. 1301–1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
 11. Bushuev Yu. G., Persin M. I., Sokolov V. A. *Uglerod-uglerodnye kompozitsionnye materialy* [Carbonium-carbonic composite materials]. Moscow, Metallurgy, 1994. 128 p.
 12. Ashikhmin V. P., Biryukov O. V., Gurin V. A., Zatoloka B. B., Kolosenko V. V., Sayenko S. Yu., Morachkovskiy O. K., Lavinskii D. V. Analiz prochnosti elementov press-form iz uglerod-uglerodnykh materialov dlya pseudoizostaticheskogo pressovaniya [The strength analysis of the moulds elements from carboneum-carbonic materials for pseudo-isostatic pressing.] *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Physics of radiation damage and radiation materials science*. 2007, № 6 (91), pp. 120–123.
 13. Sandstrom D. J. Consolidating metal powders magnetically. *Metal. Progr.* 1964, vol. 86, no 3, pp. 215–221.
 14. Mamalis A. G., Manolakas D. E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. *Applied Mechanics Reviews*. 2004, vol. 57, no. 4, pp. 299–324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>
 15. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamic*. 2016, vol. 28, no. 5. pp. 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0484-8>

Надійшла (received) 05.12.2021

Відомості про авторів / About the Authors

Аніщенко Галина Оттівна (Anischenko Galyna Ottivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теоретичної механіки; e-mail: halyna.anishchenko@khp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-4980>

Конюхов Володимир Іванович (Konokhov Volodymyr Ivanovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри механіки суцільного середовища та опору матеріалів; e-mail: volodymyr.konokhov@khp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9938-204X>

Лавінський Денис Володимирович (Lavinskyi Denys Volodymyrovych) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теоретичної механіки; тел.: (050) 566-42-92; e-mail: Denys.Lavinskyi@khp.edu.ua. ORCID: 0000-0002-1380-3131