

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELECTRON BEAM HARDENING PARAMETERS ON THE SURFACE ROUGHNESS IN C45 STEEL CYLINDRICAL SPECIMENS

Boris Toshev Petkov

Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar, Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies",
Hadji Dimitar str. 4, Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: borispetkov@mail.bg*

Abstract

The article presents the results of an experimental study of surface roughness in C45 steel cylindrical specimens treated by electron beam surface hardening. The effects of technological parameters: electron beam current I_b (mA), peripheral velocity V_w (m/s), focal length FL (mm), and scanning frequency SF (Hz) on the treated surface were investigated in terms of the 2D roughness parameter R_a using a one factor-at-a-time technique. It was found that the factors with the greatest influence on the resulting roughness are the electron beam current and the peripheral velocity. The minimum roughness values were obtained at maximum scanning frequency and minimum peripheral velocity.

Keywords: Surface roughness, Electron beam hardening, C45 carbon steel, One factor-at-a-time technique.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Високите екологични норми и цени на машиностроителни материали все по-масово налагат използването на по-евтини ниско- и средно-въглеродни стомани при производството на конструкционни елементи. За подобряване на експлоатационното им поведение е необходимо да се приложи подходяща уякчаваща технология. Основните проблеми при конвенционалните термични обработки (ТО) и химико-термични обработки (ХТО) са свързани с: 1) относително големи енергийни разходи, 2) значително производствено време и 3) замърсяване на околната среда при ХТО: цементация на ниско-въглеродни стомани и азотиране на средно-въглеродните стомани [1,2]. ХТО се прилага за осигуряване на желани характеристики на повърхностните слоеве на отговорни машинни елементи: повишена твърдост и износостойчивост на повърхностните слоеве, антикорозионна устойчивост, които водят до повишена дълготрайност [3]. По-

сочените недостатъци налагат разработването на съвременни технологии за модифициране на повърхностните слоеве на основата на съвременни, екологосъобразни и енерго- и време ефективни методи за довършващо обработване на конструкционни елементи, изработени от ниско и средно-въглеродни стомани [4]. През последните години в световен мащаб се акцентира върху разработването и изследването на методи за модифициране на повърхностните слоеве чрез концентрирани енергийни източници. Те се характеризират с много кратък интервал на въздействие - бързо нагриване и последващо бързо охлаждане на третираните повърхнини.

Според степента на въздействие върху обработваната повърхнина, методите се разделят на такива с нагриване до температура на фазово превръщане без стопяване и такива с повърхностно стопяване, при които се получава течна фаза на повърхността [3, 5]. При двата метода на въздействие се постига модифи-

циране на повърхностните слоеве. Choo et al. [6] изследват модифицирането на повърхностните слоеве на образци от стомана AISI 4140 след обработка с електронен лъч и установяват получаването на мартензитна структура в обработеният слой в корелация с повишаване на износоустойчивостта и дълготрайността на умора, като в някои случаи последната се увеличава до 35%. Hashem et al. [7] съобщават за подобрене на устойчивостта на корозия и ерозия вследствие повишаване на повърхностната твърдост на лазерно обработени образци от стомана X52. В допълнение, обработените повърхнини показват много подобри механични свойства. В [8] се доказва че чрез методите на повърхностно закаляване се въвеждат полезни остатъчни напрежения на натиск [9,10] и е показан профила им от повърхността към сърцевината на обработваните образци. Ефективен подход за модифициране на повърхностните слоеве чрез концентриран енергиен поток на метални конструктивни компоненти без промяна на химичния им състав е електронно лъчевото обработване (ЕЛО). Използването на ЕЛО позволява повърхностно закаляване на детайли с различна геометрия, вкл. със сложна форма [11]. Прилагането на прецизна фокусирана енергия чрез електронен лъч върху повърхността позволява да се запазят желаните свойства като пластичност и жилавост в сърцевината и същевременно да се повиши микротвърдостта, износоустойчивостта, модифицирана микроструктура и грапавостта на повърхностния слой [3]. Електронно-лъчевото уякчаване (ЕЛУ) е безконтактен, екологичен (обработката се извършва във вакуум при отсъствието на кислород и замърсители), бърз, надежден и енерго-ефективен метод [3, 7, 12]. Освен модифицирането на микроструктурата в повърхностния и подповърхностните слоеве [13, 14, 15], техниките за повърхностно уякчаване чрез високоенергийно лъчение има потенциал и за подобряване на повърхностната гра-

павост на стоманени конструктивни елементи. Обработката с високоенергиен лъч ефективно премахва следите от първоначалната механична обработка, като по този начин значително подобрява грапавостта на обработената повърхнина [16, 17]. ЕЛУ се характеризира с висока ефективност за модифициране на повърхностния слой, малко времетраене и липса на химическо замърсяване на околната среда. При подходяща комбинация от технологични параметри, термичното въздействие с електронен лъч върху металната повърхност причинява разтопяване на тънък повърхностен слой от повърхността, при което под въздействието на гравитацията и повърхностните напрежения, течният метал тече запълва вдлъбнатините. Ниската температура на материала в сърцевината осигурява изключително висока скорост на охлаждане за сметка на преноса на топлина предимно чрез кондуктивния топлообмен. В резултат се получава ефект на самозакаляване и подобряване на повърхностната грапавост [18]. Експерименталните изследвания, проведени в [19, 20] доказват зависимостта между големината на тока на електронния лъч, скоростта на обработване и получаваната грапавост.

Повечето изследвания, посветени на ЕЛО на образци от AISI 1045, са реализирани върху плоски образци [21, 22]. Тъй като основният фокус е върху формирането на модифицирана микроструктура вследствие фазови трансформации (21), липсват систематизирани изследвания, посветени на влиянието на технологичните параметри на процеса ЕЛУ върху получаваната грапавост.

Направеното проучване показва, че не са установени изследвания на процеса ЕЛУ за подобряване характеристиките на Surface integrity на цилиндрични образци от стомана C45.

Целта на настоящето изследване е да оцени влиянието на технологичните параметри на процеса ЕЛУ върху повърхностната грапавост на цилиндрични

образци от C45.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

2.1. МАТЕРИАЛ

За изработване на експериментални-

те образци е използван горещо-валцован прът с диаметър $\varnothing 36$ mm от средно-въглеродна стомана C45, чийто химичен състав е показан в Табл. 1.

Табл. 1

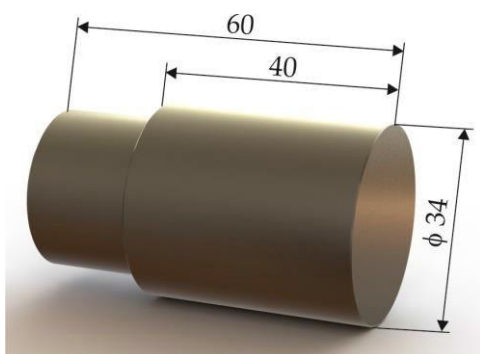
Химически анализ на стомана C45

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo
0.457	0.295	0.568	<0.001	<0.001	0.052	<0.001	0.044	<0.001
Ni	V	Ti	Nb	Co	W	Pb	Sn	
0.011	0.046	0.009	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	0.012	

2.2. ОБРАЗЦИ И ЕЛҮ

2.3.

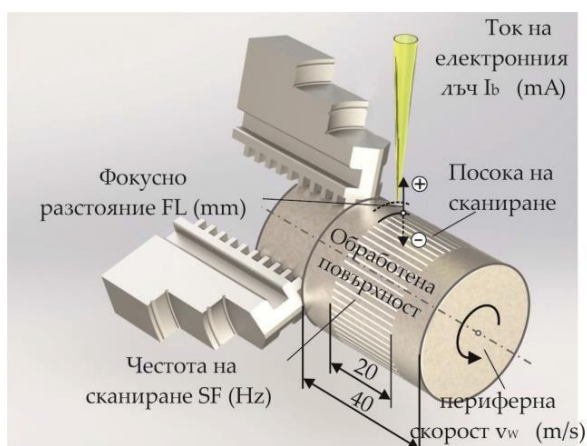
Експерименталните образци са изработени на цифрово програмен струг Index Traub CNC (Esslingen am Neckar, Germany), посредством държач DCLNR2525M12 с твърдосплавна режеща пластина CNMG120404-NSP JC8015 с предварително подбрани режими на рязане: $V_C=180$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.1$ mm/rev.



Фиг. 1. Геометрия на експерименталния образец

Геометрията и размерите на получените образци са показани на фиг. 1. Повърхностната грапавост на образците след струговане е в интервала $R_{a,init}=1.03\div 1.7$ μ m.

Процесът ЕЛҮ е проведен върху Evobeam Cube 400 (Evobeam GmbH, Nieder-Olm, Germany). Работната схема за реализация на процеса на повърхностно закаляване, визуализация на технологичните параметри и работната повърхност е представена на фиг. 2а. Фиг. 2б показва експерименталната установка, на която се виждат работния обем на машината и монтиран във въртящ се тричелюстен патронник образец. Експериментът е проведен в съответствие с техниката one-factor-at-a-time с технологични параметри с интервали на вариране, показани в табл. 2.



(a)



(b)

Фиг. 2. Принципна схема и експериментална установка на процеса на електроннолъчева обработка

Табл. 2 Интервали на вариране на технологичните параметри
Стойности на технологичните параметри

Големина на тока на електронния лъч I_b, mA	12	16.5	21	25.5	30	34.5
Периферна скорост $v_w, m/s$	0.018	0.022	0.027	0.031	0.036	0.053
Честота на сканиране SF, Hz	400	5300	10200	15100	20000	-
Фокусно разстояние FL, mm	+20	+15	+10	0	-5	-10

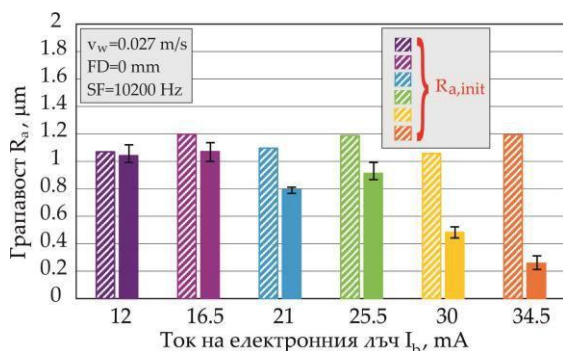
2.4. ИЗМЕРВАНЕ НА ГРАПАВОСТТА

Стойностите за грапавостта са получени като средно аритметични от измервания по три образувачи от цилиндричната повърхнина на образеца, посредством грапавомер Surftest SJ-210 (Mitutoyo, Kawasaki, Japan).

3. РЕЗУЛТАТИ – ПОВЪРХНОСТНА ГРАПАВОСТ

3.1. ВЛИЯНИЕ НА ГОЛЕМИНАТА НА ТОКА НА ЕЛЕКТРОННИЯ ЛЪЧ

На фиг. 3 е показан ефекта от изменението на големината на тока на електронния лъч I_b, mA , върху повърхностната грапавост, като останалите три фактора се поддържат на постоянни средни стойности в съответните интервали (Табл. 2).



Фиг. 3. Влияние на големината на тока на електронния лъч I_b , върху повърхностната грапавост

Измерените стойности на средната грапавост на обработените повърхнини

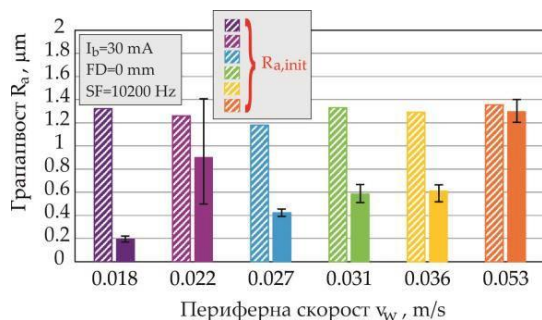
е в диапазона $R_a = 0.258 \div 1.071 \mu m$. Най-ниската стойност на грапавостта е измерена при най-големия ток на електронния лъч. В началото на изследвания интервал не се наблюдават съществени промени в повърхностната грапавост след ЕЛУ. Съществена промяна настъпва при големина на тока I_b в края на изследвания интервал. Най-голямата редукция на първоначалната грапавост е 4.6 пъти, получена за големина на тока на електронния лъч $I_b = 34.5 mA$. Посочените условия осигуряват най-голяма плътност на мощността на електронния лъч, която рефлектира в най-голямо количество топлина, въведена в повърхностния слой.

3.2. ВЛИЯНИЕ НА ПЕРИФЕРНАТА СКОРОСТ НА ОБРАЗЦИТЕ

На фиг. 4 е показан ефекта от изменението в интервала на вариране на периферната скорост $V_w, m/s$ на образеца върху повърхностната грапавост, като останалите три фактора се поддържат на постоянни средни стойности в съответните интервали.

Измерените стойности на грапавостта на образците варира в широк диапазон $R_a = 0.195 \div 1.294 \mu m$. При изменение на периферната скорост в изследвания интервал се наблюдава нарастване стойностите на повърхностната грапавост. Най-голямата редукция на началната грапавост е 6.6 пъти, получена за образеца, обработен с най-ниска пери-

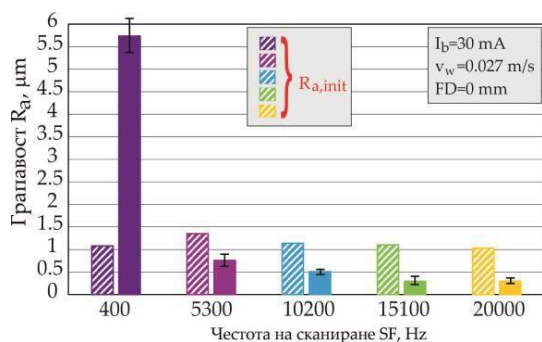
ферна скорост $V_w=0.018$ m/s, която рефлектира в най-голямо времетраене на процеса.



Фиг. 4. Влияние на периферната скорост V_w на образеца върху повърхностната грапа̀вост

3.3. ВЛИЯНИЕ НА ЧЕСТОТАТА НА СКАНИРАНЕ

Влиянието на честотата на сканиране SF върху изменението на средната стойност на повърхностната грапа̀вост е показано на фиг. 5.



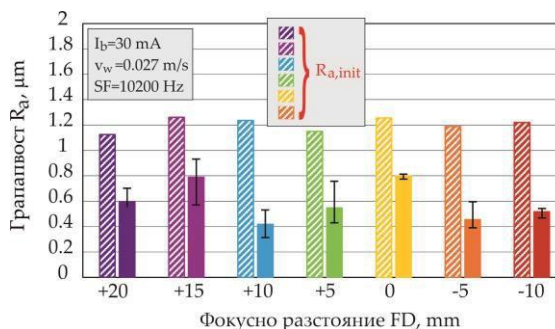
Фиг. 5. Влияние на честотата на сканиране SF върху повърхностната грапа̀вост

Грапа̀востта на обработените повърхности се променя в диапазона: $R_a=0.295\div5.735$ μm . Наблюдава се ясно изразен тренд за намаляване на получената грапа̀вост с увеличаване на честотата на сканиране в изследвания диапазон. При най-ниската изследвана стойност на честотата на сканиране от SF=400 Hz се наблюдава 5,3 пъти по голяма грапа̀вост спрямо изходната. Тази влошена повърхностна топография се дължи на силно изразения ефект на препокриване в окръжно направление в този режим на сканиране. Очаквано, най-малка грапа̀вост се наблюдава при най-

голямата честота на сканиране SF=20000 Hz, която води до най-хомогенна повърхнина.

3.4. ВЛИЯНИЕ НА ФОКУСНОТО РАЗСТОЯНИЕ

Ефектът от изменение на фокусното разстояние FL върху средната стойност на повърхностната грапа̀вост е показан на фиг. 6.



Фиг. 6. Влияние на фокусното разстояние FL върху повърхностната грапа̀вост

В целия интервал на изследване на фокусното разстояние няма ясно изразена тенденция в промяна на получаваната грапа̀вост. От всички изследвани технологични параметри на процеса ЕЛУ, влиянието на фокусното разстояние е най-слабо изразено, като разликата между минималната и максималната стойност на грапа̀востта е приблизително 2 пъти. Минимална грапа̀вост е получена при FL=+10 mm.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталното изследване представя индивидуалните ефекти на технологичните параметри на процеса ЕЛУ върху повърхностната грапа̀вост на цилиндрични образци от стомана С45, проведено на база на техниката one-factor-at-a-time. На база на експерименталните резултати са установени следните основни изводи:

- Най-голямо влияние върху получената грапа̀вост на цилиндричните повърхнини оказват големината на тока на електронния лъч, честота на сканиране и периферната скорост. Най-ниска

средна грапавост: $Ra=0.195\text{ }\mu\text{m}$ е получена при най-ниската периферна скорост $V_w=0.018\text{ m/s}$;

• Установено е, че при стойности на тока на електронния лъч от 12 и 16.5 mA, стойностите на средната грапавост практически не се променят. При ЕЛУ с честота на сканиране $SF=400\text{ Hz}$ средната грапавост се влошава драстично ($Ra=5.735\text{ }\mu\text{m}$). При използване на относително големи положителни стойности на фокусното разстояние (+15 mm и +20 mm) грапавостта се влошава в резултат на намаляването на плътността на генерирания топлинен поток.

С цел последваща оптимизация на процеса ЕЛУ на цилиндрични образци от C45 и като резултат от направеното експериментално изследване се предлагат следните интервали на вариране на основните технологични параметри: големина на тока на електронния лъч $I_b=20\div 35\text{ mA}$, периферна скорост $V_w=0.018\div 0.036\text{ m/s}$, честота на сканиране $SF=5000\div 20000\text{ Hz}$ и фокусно разстояние $Fl=+10\div -10\text{ mm}$.

Получените резултати позволяват след оптимизация на технологичните параметри на ЕЛУ да се реализира високо-ефективен, ресурсно-оптимизиран и екологичен процес за третиране на цилиндрични детайли от средно въглеродна стомана C45 с възможност да се управлява повърхностната грапавост и другите параметри на Surface integrity.

Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, R.A. Dostovalov, A.I. Popelyukh, E.A. Drobyaz Surface hardening of steels with carbon by non- vacuum electron-beam processing. Surface and Coatings Technology. 242 (2014) 164- 169.
- [2] Maximov J., A. Anchev, V. Todorov. Material science and Heat treatment. Part: II. Heat treatment of metals. “Vasil Aprilov”. Gabrovo. 2022
- [3] Piotr Śliwiński, Marek St. Węglowski, Krzysztof Kwieciński, Andrzej Wiczorek. Electron Beam Surface Hardening. Materials Science and Welding Technologies. 1 (2022) 7-20.
- [4] Q.F. Guana, H. Zoua, G.T. Zoua, A.M. Wub, S.Z. Haob, J.X. Zoub, Y. Qinb, C. Dongb, Q.Y. Zhangb. Surface nanostructure and amorphous state of a low carbon steel induced by high-current pulsed electron beam. Surface & Coatings Technology. 196 (2005) 145– 149
- [5] T. Grosdidiera, J.X. Zoua, B. Bollec, S.Z. Haob, C. Dongb. Grain refinement, hardening and metastable phase formation by high current pulsed electron beam (HCPEB) treatment under heating and melting modes. Journal of Alloys and Compounds 504S (2010) S508–S511.
- [6] Seong-Hun Choo, Sunghak Lee, Mikhail G. Golkovski. Effects of accelerated electron beam irradiation on surface hardening and fatigue properties in an AISI 4140 steel used for automotive crankshaft. Materials Science and Engineering A293 (2000) 56-70.
- [7] Hashem F. El-Labban, M. Abdelaziz and Essam R.I. Mahmoud. Modification of Carbon Steel by Laser Surface Melting: Part I: Effect of Laser Beam Travelling Speed on Microstructural Features and Surface Hardness. American Journal of Engineering and Applied Sciences 6 (4) (2013) 352-359.
- [8] O V Chudina and Yu M Luzhnov. The concept of structural steels surface hardening for tribojoint elements. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 1159 (2021) 012080
- [9] Zhiyong Han, Le Ji, Jie Cai, Hui Zou, Zhiping Wang, Qingfeng Guan. Surface Nanocrystallization of 3Cr13 Stainless Steel Induced by High-Current Pulsed Electron Beam Irradiation. Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials. 2013 (6300).

- [10] Shengzhi Hao, Bo Gao, Aimin Wu, Jianxin Zou, Ying Qin, Chuang Dong, Jian An, Qingfeng Guan. Surface modification of steels and magnesium alloy by high current pulsed electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 240 (2005) 646–652
- [11] Matlák Jiří, Foret Rudolf, Dlouhý Ivo. Influence of the beam deflection on properties of the electron beam hardened layer. *International scientific journal “Materials science. Non-equilibrium phase transformations”*. 3 (5) (2017) 194-197.
- [12] Ye Li, Yan Wang, Jingzhe Niu, Shifeng Liu, Yan Lin, Nan Liu, Jun Ma, Zhaohui Zhang, Jian Wang. Microstructure and mechanical properties of M2 high speed steel produced by electron beam melting. *Materials Science & Engineering A*. 862 (2023) 144327
- [13] Shengzhi Hao, Pingsheng Wu, Jianxin Zou, Thierry Grosdidier, Chuang Donga. Microstructure evolution occurring in the modified surface of 316L stainless steel under high current pulsed electron beam treatment. *Applied Surface Science*. 253 (2007) 5349–5354.
- [14] Valkov S, Ormanova M, Petrov P. Electron-Beam Surface Treatment of Metals and Alloys: Techniques and Trends. *Metals*. 2020; 10(9):1219.
- [15] Y. Haoa, B. Gaoa, G.F. Tuae, H. Caoa, S.Z. Haob, C. Dongb. Surface modification of Al–12. 6Si alloy by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 258 (2012) 2052– 2056.
- [16] Ziyang Feng, Jing Wang, Fujian Zhang, Jiaojiao Liu, Jianjun Hu, Linjiang Chai, Bo Song, Ning Guo, Shengfeng Guo, Zhongwen Yao. Effect of high current pulsed electron beam on surface microstructure and properties of cold-rolled austenitic stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 29 (2024) 1183–1193.
- [17] Yulei Fu, Jing Hu, Xianfeng Shen, Yingying Wang, Wansheng Zhao. Surface hardening of 30CrMnSiA steel using continuous electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 410 (2017) 207–214.
- [18] Xinkai Li, Rong Wang, Zhe Xin, Yujian Dong, Jiahong Xu, Deqiang Wei. Changes in surface roughness and microstructure of 45 steel after irradiation by electron beam. *Materials Letters*. 296 (2021) 129934.
- [19] Xinkai Li, Rong Wang, Qichao Wang, Jinke Guo, Ruihua Xian. Scanning electron beam polishing and defect analysis of 65 steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 490 (2021) 34–38.
- [20] Tiantian Deng, Zhizhen Zheng, Jianjun Li, Yibo Xiong, Jinyong Li. Surface polishing of AISI 304 stainless steel with micro plasma beam irradiation. *Applied Surface Science*. 476 (2019) 796–805.
- [21] Yulei Fua, Jing Hua, Xianbing Zhangb, Weijie Huoa, Xiaotong Caoa, Wansheng Zhaoa. Surface modification of AISI 1045 steel by pseudospark based pulsed electron beam. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*. 434 (2018) 88–92.
- [22] P Petrov. Optimization of carbon steel electron-beam Hardening. *J. Phys.: Conf. Ser.* 223 012029