

[0000-0002-2166-7766] **В. І. Осипенко**, д.т.н., професор,

e-mail: osip5906@gmail.com

[0000-0002-5055-1068] **А. В. Кондаков**, аспірант,

e-mail: kondakov.chdtu@gmail.com

[0000-0001-8637-8741] **О. В. Тімченко**, асистент

e-mail: alec.timchenko@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ В ІНСТРУМЕНТАЛЬНІЙ СТАЛІ У7А ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ДРОТЯНОГО ВИРІЗАННЯ

Розглянуто питання визначення залишкової напруги в тонкій пластині зі сталі У7А, робоча поверхня якої в різних технологічних випадках формувалася за різними технологіями, а саме: електроерозійним дротяним вирізанням (ЕЕДВ) повного зйому (пз), додатковими проходками (дп) з різною енергією одиничного іскрового розряду, послідовним пошировим зніманням матеріалу зони термічного впливу (ЗТВ) на високоточних контрольованих режимах електрохімічної розмірної обробки (ЕХРО). Залишкові напруги вперше визначалися шляхом механічного вимірювання залишкових деформацій пластини безпосередньо в робочій ванні верстата (без зняття отриманих зразків) та розрахунків напружень за відомим рівнянням, що описує зв'язок між кривизною зразка та залишковою напругою для одновимірного напруженого випадку. Отримана база даних за розрахунками залишкових напружень у ЗТВ сталі У7А після ЕЕДВ добре корелює з результатами робіт провідних дослідників у царині електроерозійних технологій та процесів взаємодії плазми електричного розряду з металами. Результати дали змогу визначити рівні виникаючих залишкових напруг у ЗТВ сталі У7А після ЕЕДВ і встановити їх залежність від енергії одиничного іскрового розряду. Для конкретного технологічного випадку виявлено, що максимальні значення залишкових напруг релаксують у часі і падають зі зменшенням товщини ЗТВ. Ціком усувати залишкові напруги можливо лише при повному видаленні ЗТВ за технологією нетермічної ЕХРО, тому що режими ЕЕДВ, навіть з мінімальними енергіями розрядів, формують ЗТВ і відповідні залишкові напруги. Отримані в роботі результати можуть бути використані при проектуванні високоточних режимів електроерозійної і комбінованої послідовної електроерозійної та електрохімічної обробки незмінним дротяним електродом. Окрім того, отримано додаткове підтвердження можливостей новітньої комбінованої послідовної електроерозійної та електрохімічної технології керовано не тільки формувати мікрогеометрію поверхонь, але й залишати в поверхневих шарах необхідний рівень залишкових напруг або повністю позбавлятися від них.

Ключові слова: електроерозійне дротяне вирізання, електрохімічна розмірна обробка, залишкова напруга, зона термічного впливу, одиничний іскровий розряд.

Постановка проблеми. Відомо, що електроерозійна обробка спричиняє залишкові напруження розтягу, що утворюються у верхньому шарі оброблюваної поверхні за рахунок термічного формування суттєвих змін у структурі матеріалу деталі у так званій ЗТВ [1].

Функціональна ефективність широкого класу інструментів і деталей суттєво визначається властивостями поверхневих шарів, а також характером розподілу та величиною залишкових напружень поблизу робочих поверхонь. Внаслідок особливостей формування залишкові термонапруги при ЕЕДВ є напругами 1-го роду, тобто вони наявні в макроскопічних масштабах і проходять поперек зерна [2]. Рівень і характер розподілу залишкових термонапруг впливають на стабільність

розмірів, параметри втомної міцності та схильність оброблених поверхонь до корозії. При цьому у деяких випадках після дротяної електроерозії на чорнових режимах (різання повного зйому) спостерігаються великі деформації окремих частин деталі, що робить подальшу обробку неможливою [3]. Тому знання величини та характеру розподілу залишкових напружень є важливою сполучною ланкою між проектуванням технологічного процесу, виробничим процесом і кінцевою якістю заготовки.

Мета. Підвищення ефективності проектування технологічних процесів електроерозійного дротяного вирізання шляхом врахування впливу залишкових термонапруг, які виникають завдяки наявності ЗТВ.

Задачі:

1. Запропонувати схему експерименту по визначенню та розрахунку залишкових термонапруг при використанні електроерозійного вирізного верстата СЕЛД-02М, укомплектованого системою для ЕХРО.

2. Провести серію експериментів і сформувати базу даних для розрахунку залишкових термонапруг у сталі У7А при формуванні поверхні електроерозійним дротяним вирізанням з різною енергією одиничного іскрового розряду з послідовним пошаровим зніманням матеріалу зони термічного впливу на високоточних контрольованих режимах ЕХРО.

3. Встановити закономірності розподілу термонапруг у ЗТВ сталі У7А залежно від енергетичних параметрів режимів ЕЕДВ.

Аналіз останніх досліджень. Незважаючи на значне поширення електроерозійної обробки в сучасному виробництві, робіт, присвячених проблемам залишкових термонапруг, досить мало, особливо стосовно технологій електроерозійного дротяного вирізання. В роботі [4] автори встановили негативний вплив залишкових напружень, спричинених електроерозійною технологією формування поверхонь, на втомну міцність деталей медичної апаратури. Клінк та ін. [5] вивчали розподіл залишкової напруги в поверхневих шарах інструментальної сталі ASP 23, отриманих за технологією ЕЕДВ. При дослідженнях використовувалися точні, але дорогі методи дифракції рентгенівських променів та нейтронної дифракції. Ці прямі методи дають можливість виміряти залишкові напруги 1-го роду і 2-го роду. Отримані результати показали високу зону залишкової напруги в межах 30 мкм від верхньої поверхні. Антар та ін. [6] виявили подібні тенденції. В роботі [7] також показано, що деталі після ЕЕДВ мали високі залишкові напруження в ЗТВ. Їх термін експлуатації за показниками втомної міцності суттєво поступався аналогічним деталям, виготовленим класичним фрезеруванням, які мали у поверхневих шарах стискаючі напруги. В роботі [8] запропоновано математичну модель формування залишкових напруг у ЗТВ при масовій дії високочастотних розрядів. Результати чисельних експериментів задовільно узгоджуються з експериментальними даними. При цьому для зменшення максимальних значень залишкових напружень автори пропонують використовувати розряди з мінімальною енергією, що на практиці, з різних міркувань, складно реалізувати. Таким чином, дослідження напруг, що виникають у ЗТВ сталевих деталей, при використанні енергетичних режимів

різання, характерних для вітчизняних генераторів електроерозійних вирізних верстатів, як і можливості ЕХРО для їх усунення, є сучасними актуальними науковими задачами.

Виклад основного матеріалу. Ця робота – спроба оцінити залишкові термонапруги в сталі У7А залежно від глибини зони структурних змін при електроерозійному дротяному вирізанні шляхом механічного вимірювання залишкових деформацій і розрахунків напружень за відомим рівнянням (1), що описує зв'язок між кривизною зразка та залишковою напругою для одновимірного напруженого випадку. Схему виконання експерименту зображено на рисунку 1. Уявлення про поведінку обробленої пластини можна отримати з рисунка 2.

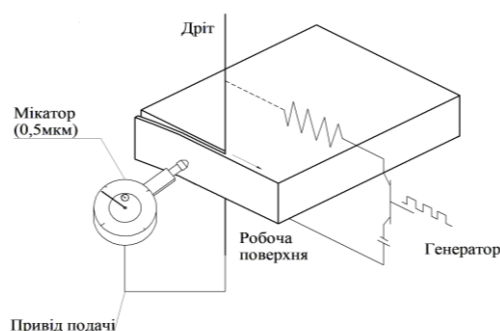


Рисунок 1 – Схема різання та вимірювання деформації зразків у робочій ванні електроерозійного верстата СЕЛД-02М

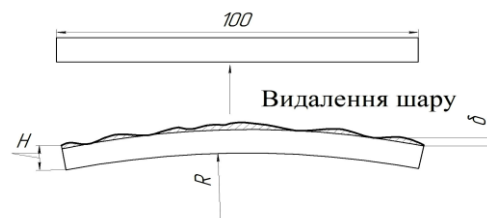


Рисунок 2 – Зміна вигину оброблюваної пластини при видаленні зони термічного впливу

У пластині зі сталі У7А товщиною 20 мм виконувалися пластинчаті надрізи шириною $H=0.5$ мм і довжиною 100 мм як різанням повного зйому, так і додатковими проходками на енергетичних режимах різання, що наведені в таблиці 1. Електричні параметри розрядів на кожному режимі записувалися на цифровий осцилограф, дані з якого оброблялися в системі автоматизованого проектування (САПР) AutoCAD 2010 (рисунок 3) Після кожного проходу за допомогою мікатора (рисунок 1) визначалися величини відхилення в заданих координатах бічної поверхні пластини надрізу від прямолінійного положення.

Отримані дані вносилися в AutoCAD 2010, за допомогою якого визначався реальний радіус кривизни пластини. Після електроерозії установка перемикалася в режим електрохімічної обробки поверхні [9] в електроліті (водний розчин хлориду натрію, NaCl 15 %) і виконувалося пошарове знімання матеріалу ЗТВ на високоточних контрольованих режимах.

Таблиця 1 – Електричні параметри генератора технологічного струму ГКІ 300-200 для різання повного зйому (пз) і додаткових проходів (дп)

Параметри	Режими				
	№1 пз 22 кГц	№2 дп 22 кГц	№3 дп 88 кГц	№4 дп 200 кГц	№5 дп 200 кГц
τ_U , мкс	7,48	7,32	1,7	1,26	1,1
τ_I , мкс	9,48	7,32	2,44	1,1	0,95
τ_{xx} , мкс	9,2	5,22	1,99	1,22	1,1
$U_{пр}$, В	51,8	52,5	41,6	41,7	38,5
U_D , В	66,5	65,3	50,65	43,1	40,2
U_{xx} , В	158,2	108,2	108,1	60,3	55,7
I , А	111,1	84,7	29,7	12,12	9,8
$E_{макс}$, МДж	3,3	2,18	0,70	0,434	0,28

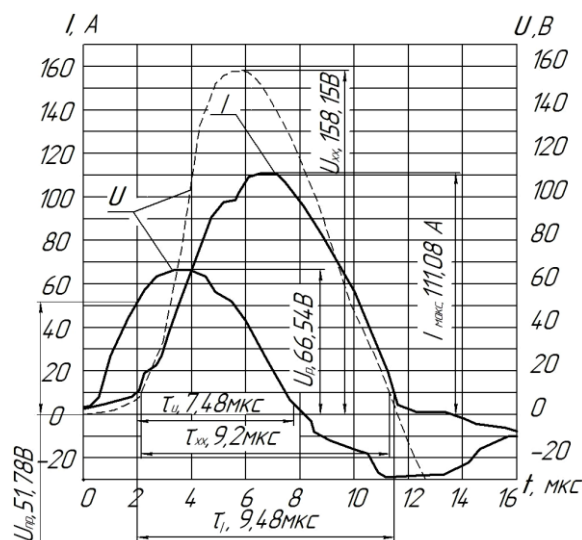


Рисунок 3 – Осцилограми струму (I) та напруги (U) одиничного розряду режиму №1 пз (таблиця 1)

$$\sigma = -\frac{1}{6} \cdot E \cdot (H - \delta)^2 \cdot \frac{dC(\delta)}{d\delta} + \frac{2}{3} \cdot E \cdot (H - \delta) \cdot C(\delta) + \frac{1}{3} E \cdot C(\delta_{\max}) \cdot (3 \cdot \delta - 2 \cdot H) - \frac{1}{3} E \cdot \int_0^{\delta} C(\delta) \cdot d\delta, (1)$$

де σ – залишкова напруга;

H – товщина пластини;

δ – глибина ЗТВ;

E – модуль пружності сталі У7А;

$C = 1/R$ (R – радіус кривизни пластини).

За один технологічний прохід знімався 15^{+3} мкм структурно зміненого шару, після чого кожного разу знову контролювався реальний залишковий прогин деталі. В кожному технологічному випадку (як після різання повного зйому, так і після додаткових проходів) процес продовжувався до повного видалення ЗТВ. Використовуючи отриману базу даних, за рівнянням (1) розраховувалися напруження в конкретній зоні структурно зміненого шару. На рисунку 4 показано розраховані напруження в ЗТВ відразу після різання повного зйому.

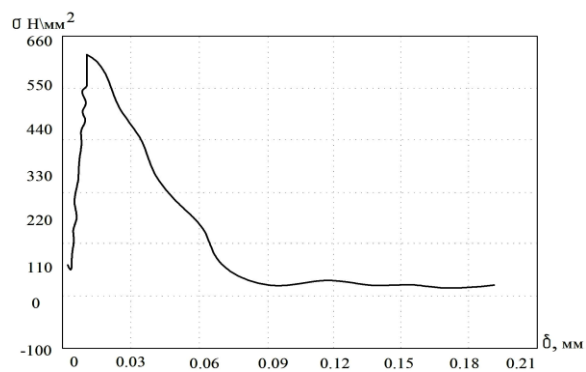
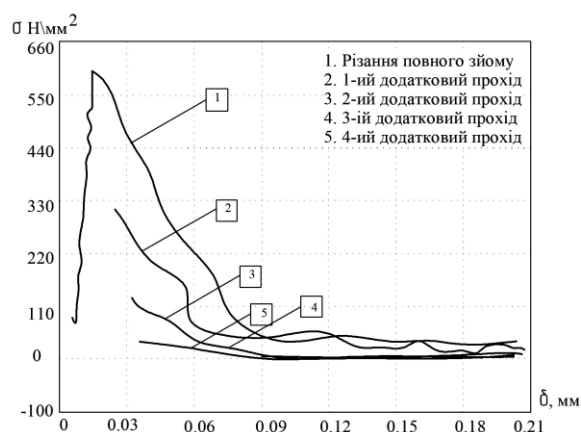
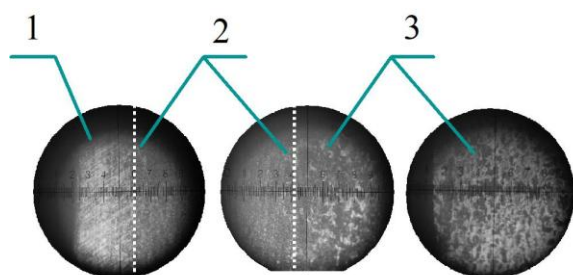


Рисунок 4 – Профіль залишкових напруг після різання повного зйому

На рисунку 5 показано напруження після різання повного зйому і чотирьох додаткових проходів. Як і слід було очікувати, в обох випадках залишкові напруги розтягнення наявні в шарі ЗТВ. Для чорнової обробки пік напруження не перебуває на поверхні, а знаходиться трохи нижче. Це можна пояснити тим, що білий шар має багато пустот і мікротріщин, які викликають розслаблення залишкових напружень. Після досягнення піку напруги розтягуюча напруга зменшується практично до нуля за межами ЗТВ. Отримані результати задовільно узгоджуються з даними по структурі поверхневих шарів сталі, які отримані за допомогою мікросліфів (рисунк 6).



Рисунк 5 – Профілі залишкових напруг для різання повного зйому та наступних проходів на режимах, наведених у таблиці 1



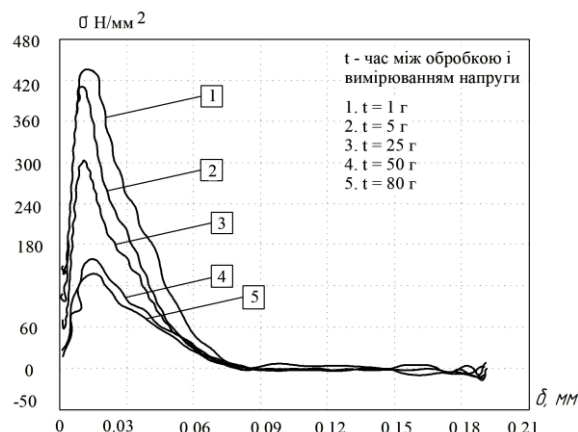
1 – поверхневий (білий) шар ~ 20 мкм;
2 – перехідний (структурно змінений шар) ~ 0,054 мм; 3 – основний матеріал після повного видалення ЗТВ за технологією EXPO

Рисунк 6 – Мікросліфи зразків після різання повного зйому та EXPO

Після чотирьох додаткових проходів залишкова напруга значно нижча, а наявність розтягуючих напруг обмежується меншою глибиною (рисунк 5). Проте максимальна

напруга розтягу спостерігається на верхній поверхні, сформованій конкретним проходом. Там немає ніяких ознак релаксації.

На рисунку 7 показано профілі напруг для зразків після чорнового різання зі змінним часом між фактичною обробкою електроерозією і вимірюванням деформацій та розрахунків напруги. Максимальна напруга знижується в часі, в той час як глибина максимального напруження і глибина проникнення розтягуючої напруги залишаються такими ж.



Рисунк 7 – Релаксація залишкових напруг в ЗТВ у часі після чорнової обробки

Висновки:

1. Розроблено та адаптовано методику визначення напруг у ЗТВ після електроерозійного дротяного різання у відомих простих технологічних схемах.

2. Вимірювання залишкової напруги в ЗТВ сталі У7А після дротяного електроерозійного різання повного зйому та додаткових проходів показали, що максимальна напруга розтягу скорочується зі збільшенням кількості додаткових проходів.

3. Для чорнової електроерозії спостерігається релаксація залишкових напружень у часі, що зменшує максимальне залишкове напруження розтягу.

4. Підтверджено технологічні можливості EXPO керувати формуванням не тільки мікрогеометрії поверхонь, але й залишати в поверхневих шарах необхідний рівень залишкових напруг або повністю позбавлятися від них.

Список літератури

- [1] Н. К. Фотеев, *Технология электроэрозионной обработки*. Москва: Машиностроение, 1980.

- [2] E. Macherauch, "Introduction to residual stress", in *Advances in surface treatments: 4. Residual stresses*, Pergamon Oxford, 1987, pp. 1-35.
- [3] E. Macherauch, and K. H. Kloos, "Origin, measurement and evaluation of residual stresses. Residual stresses in science and technology", in *Int. Conf. on Residual Stresses*, 1986, Garmisch-Partenkirchen, E. Macherauch and V. Hauk, Eds. Germany, 1987, pp. 3-26.
- [4] J. Liu, L. Li, and Y. Guo, "Surface integrity evolution from main cut mode to finish trim cut mode in W-EDM of shape memory alloy", *Applied Surface Science*, 308, pp. 253-260, 2014.
- [5] A. Klink, Y. B. Guo, and F. Klocke, "Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finishing trim cuts in wire-edm", *Procedia Engineering*, 19, pp. 178-183, 2011.
- [6] M. Antar, S. Soo, D. Aspinwall, M. Cuttall, R. Perez, and A. Winn, "WEDM of aerospace alloys using 'CleanCut' generator technology", *ISEM XVI*, Shanghai, pp. 285-290, 2010.
- [7] M. T. Antar et al., "Fatigue response of Udimet 720 following minimum damage WEDM", *Materials & Design*, 42, pp. 295-300, 2012.
- [8] J. F. Liu, and Y. B. Guo, "Residual stress modeling in electric discharge machining (EDM) by incorporating massive random discharges", in *3rd CIRP Conf. Surface Integrity (CIRP CSI). Procedia CIRP*, 45, pp. 299-302, 2016.
- [9] А. В. Билан, В. И. Осипенко, Д. О. Ступак, и Я. Д. Король, "Особенности формирования микрогеометрии и физических свойств поверхностных слоев стали при электроэрозионной вырезной обработке и последовательной электроэрозионной и электрохимической обработке проволоочным электродом", *Уральский научный вестник*, № 12 (48), с. 27-34, 2012.
- [10] А. В. Билан, В. И. Осипенко, и А. П. Плахотный, "Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволоочным электродом", *Вісник СевНТУ. Серія «Машинобудування та транспорт»*: зб. наук. праць (Севастополь), вип. 118, с. 107-112, 2011.
- ### References
- [1] N. K. Foteev, *Electrical discharge technology*. Moscow: Mashinostroenie, 1980 [in Russian].
- [2] E. Macherauch, "Introduction to residual stress", in *Advances in surface treatments: 4. Residual stresses*, Pergamon Oxford, 1987, pp. 1-35.
- [3] E. Macherauch, and K. H. Kloos, "Origin, measurement and evaluation of residual stresses. Residual stresses in science and technology", in *Int. Conf. on Residual Stresses*, 1986, Garmisch-Partenkirchen, E. Macherauch and V. Hauk, Eds. Germany, 1987, pp. 3-26.
- [4] J. Liu, L. Li, and Y. Guo, "Surface integrity evolution from main cut mode to finish trim cut mode in W-EDM of shape memory alloy", *Applied Surface Science*, 308, pp. 253-260, 2014.
- [5] A. Klink, Y. B. Guo, and F. Klocke, "Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finishing trim cuts in wire-edm", *Procedia Engineering*, 19, pp. 178-183, 2011.
- [6] M. Antar, S. Soo, D. Aspinwall, M. Cuttall, R. Perez, and A. Winn, "WEDM of aerospace alloys using 'CleanCut' generator technology", *ISEM XVI*, Shanghai, pp. 285-290, 2010.
- [7] M. T. Antar et al., "Fatigue response of Udimet 720 following minimum damage WEDM", *Materials & Design*, 42, pp. 295-300, 2012.
- [8] J. F. Liu, and Y. B. Guo, "Residual stress modeling in electric discharge machining (EDM) by incorporating massive random discharges", in *3rd CIRP Conf. Surface Integrity (CIRP CSI). Procedia CIRP*, 45, pp. 299-302, 2016.
- [9] A. V. Bilan, V. I. Osypenko, D. O. Stupak, and J. D. Korol, "Features of the formation of microgeometry and physical properties of the surface layers of steel during electrical discharge machining and sequential electrical discharge and electrochemical processing with a wire electrode", *Uralskii nauchnyi vestnik*, no. 12 (48), pp. 27-34, 2012 [in Russian].
- [10] A. V. Bilan, V. I. Osypenko, and O. P. Plakhotnyi, "Study of the processes of material removal during electrochemical dimensional processing with a wire

electrode", *Visnyk SevNTU. Ser. Mashynopriladobuduvannya ta transport*: col. of

sci. works (Sevastopol), vol. 118, pp. 107-112, 2011 [in Russian].

V. I. Osypenko, *D.Tech.Sc., professor*,
e-mail: osip5906@gmail.com

A. V. Kondakov, *postgraduate*,
e-mail: kondakov.chdtu@gmail.com

O. Timchenko, *assistant lecturer*
e-mail: alec.timchenko@gmail.com

Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN U7A INSTRUMENTAL STEEL AFTER ELECTROEROUSIVE WIRE CUTTING

The article deals with residual stresses in thin plate of U7A steel, the working surface of which in different technological cases has been formed by different technologies, namely: main cut by wire electrical discharge machining (WEDM), additional passages with different energy of single spark discharge, sequential layer-by-layer removal of heat affected zone (HAZ) material using high-precision controlled electrochemical modes. Residual stresses were first determined by mechanical measuring of residual plate deformations directly in the machine's working bath (without removing the obtained samples) and calculating the stresses by a known equation which describes the relationship between the sample curvature and the residual stress for a one-dimensional stressed case. The obtained database after the calculations of residual stresses in U7A steel after WEDM correlates well with the results of work of leading researchers in the field of erosion technologies and processes of interaction of electric discharge plasma with metals. The results make it possible to determine the residual stress levels in the HAZ of U7A steel after WEDM and to determine their dependence on the energy of a single spark discharge. For the specific technological case, it is found that the maximum residual stresses relax over time and decrease with decreasing the thickness of the HAZ. It is possible to completely eliminate residual stresses only with the complete removal of the HAZ by non-thermal electrochemical technology, since WEDM modes, even with minimum discharge energies, form the HAZ and corresponding residual stresses. The results obtained can be used in the design of high-precision modes of electrical discharge and combined sequential WEDM and electrochemical machining with the same wire electrode. Besides, additional confirmation of the capabilities of the latest combined sequential WEDM and electrochemical technology not only to form the microgeometry of the surfaces, but also to obtain in the surface layers the required level of residual stresses or to completely eliminate them is obtained.

Keywords: wire electrical discharge machining, electrochemical dimensional processing, residual stress, heat affected zone, single spark discharge.