

М. Когут<sup>1</sup>, докт. техн. наук; Р. Гуменюк<sup>1</sup>; М. Бужанський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Львівський національний аграрний університет

<sup>2</sup>Управління будівельно-монтажних робіт (Укргазспецбудмонтаж)

## ФРАКТОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АРМАТУРНИХ СТАЛЕЙ ЗА УМОВ ПОПЕРЕДНЬОГО ЕЛЕКТРОНАГРІВАННЯ ТА ДЕФОРМУВАННЯ РОЗТЯГОМ

*В роботі виконано фрактографічні дослідження структурних змін у зв'язку з анізотропією (вздовж і поперек прокату прутків) арматурних сталей 35ГС і 25Г2С за умов попереднього електронагрівання та фіксованого деформування розтягом і кінцевого охолодження. Встановлено, що утворення голкового низькотемпературного мартенситного бейніту з наявністю ямок (плям) з сульфідами MnS та домішок сірки і фосфору в структурі сталей призводять до зниження тріщиностійкості ( $K_{IC}$ ) на ділянках біля заземленої частини арматурного прутка. Порівнявши структурні зміни в досліджуваних сталях і значення тріщиностійкості ( $K_{IC}$ ) у фіксованих 6-ти точках, які пройшли різні температури нагрівання по довжині (6м) прутка, перевагу щодо міцності надаємо сталі 25Г2С порівняно зі сталлю 35ГС.*

**M. Kogut, R. Humenyuk, M. Buzhanskyj**

## FRACTIONAL GRAPHIC RESEARCH OF REINFORCED STEEL UNDER CONDITIONS OF PRELIMINARY ELECTRIC HEATING AND DEFORMATION OF TENSION

*The article reveals results of fractional graphic research of the structural changes along and across the rolling of rods of reinforced steel 35 GC and 35G2C under conditions of preliminary electric heating and fixed deformation (tension) by jammed lengthening and cooling after electric heating has been switched on. It is determined that formation of needle low-temperature martensite beignet with little pits (spots) of sulfide MnS and additions of sulfur and phosphorus in the structure of steel leads to decrease of crack resistance ( $K_{IC}$ ) in the jammed part of the reinforced rod. Having compared structural changes in the steel under research and magnitude of crack resistance in the fixed points, subjected to various temperatures of heating? We give our preference to the steel 25G2C over the steel 35C.*

*Key words: crack, steel, electric heating.*

**Постановка проблеми.** Макрофрактографія як метод оцінки причин зламу деталей машин застосовується ще з початку ХХ століття. Проте тільки використання оптичної та особливо електронної мікроскопії дало змогу підняти фактографічний аналіз до рівня вагомого інструменту з вивчення проблем механіки крихкого та квазікрихкого руйнування конструкційних матеріалів [1,2], сплавів [12] та їх зварних з'єднань [3], зокрема, встановлення механізму структурних змін по довжині арматурного стрижня за умов електронагрівання та деформування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні важко уявити серйозне комплексне узагальнююче дослідження з проблеми міцності конструкційних сплавів, складнолегованих сталей та їх зварних з'єднань, в якому не використовувалася б електронна фрактографія для оцінок будови зламів з використанням стереоскопічного аналізу фрактограм, статистичного обчислення, аналізу спряжень поверхонь зламів, мікрогеометричного перегляду профілю зламу тощо.

Перші електроннофрактографічні дослідження вітчизняних дослідників стосувалися волокнистого руйнування металів при розтягу та втомі, які показали значні можливості цього методу [4, 5], а також розтягу, кручення, втомі зміцнених конструкційних та інструментальних сталей після термомеханічної обробки [6]. Закордонні дослідники вивчали явища крихкої міцності металевих матеріалів при короткочасних та тривалих випробуваннях, втомного поширення тріщин [7, 8].

Певні напрацювання щодо вивчення впливу історії навантаження після попереднього деформування конструкційних та легованих сталей, алюмінієвих сплавів на їх структурні зміни, отримавши автори [9,12,13], досвід яких узагальнено в монографічних працях [10, 11]. Разом з тим мало досліджень, які стосуються вивчення якісної картини, тобто структурних змін у пруткових матеріалах, які витримали температурне видовження від електронагрівання та різкого охолодження при фіксованому видовженні, яким створюють попередній натяг та виникнення напружень стиску від такого охолодження прутка.

Вміле використання електронної фрактографії в поєднанні зі структурним аналізом та аналітичними даними (параметрами тріщиностійкості) механіки руйнування дозволить детальніше розкрити суть складних і тонких процесів руйнування конструкційних матеріалів з урахуванням впливу технологічних чи металургійних чинників і запропонувати певні рекомендації щодо керування їхніми властивостями.

Дана робота є продовженням кількісної оцінки міцності арматурних сталей 35ГС і 25Г2С за тріщиностійкістю ( $K_{1C}$ ) після випробування циліндричних зразків (діаметром  $D=10\text{мм}$  і загальної довжини  $L=100\text{мм}$ ) за методикою [2]. Одержані таким чином значення  $K_{1C}$  наведено в табл.1.

**Постановка завдання.** Метою даних досліджень було виявлення якісних змін структури зламів арматурних прутків із сталей 35ГС і 25Г2С після попереднього електронагрівання та деформування, які пройшли на шести ділянках їхньої довжини фіксовані температури (табл.1).

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації поставленої мети розглянуто два прутки довжиною  $L=6300\text{мм}$ , які з лівого боку були жорстко защемлені, а з правого боку – піддані електронагріванню і фіксованому затиску цангою після видовження та кінцевого охолодження з відключенням від електромережі. В результаті прутки одержали попереднє деформування (натяг) після охолодження. Із цих прутків в реперних точках (див. рис.1) було вирізано шість зразків із сталі 35ГС загальної довжини  $l=350\text{мм}$  та діаметром  $D=14\text{мм}$  і шість зразків із сталі 25Г2С загальної довжини  $l=350\text{мм}$  та діаметром  $D=12\text{мм}$  відповідно.

В табл.1 подано значення міцнісних характеристик  $\sigma_b$  і  $\sigma_t$ , які були одержані за методикою [14] після осьового розтягу прутків вищенаведених розмірів, вирізаних в реперних точках 1–6 з різними значеннями температур нагрівання (див. рис.1).

Для визначення якісних змін у структурі випробуваних прутків за умов попереднього електронагрівання та деформування у шести реперних точках (див.рис.1) для виготовлення шліфів вирізали фрагменти дисків вздовж і поперек до осі прутка. В результаті для досліджень використали по дванадцять дисків для сталі 35ГС і 25Г2С відповідно.

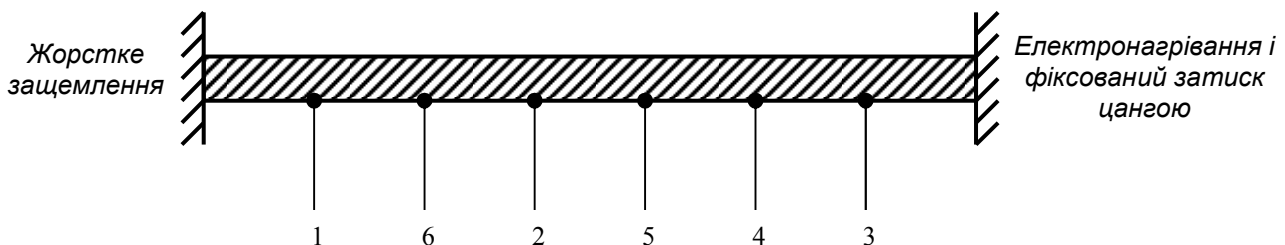


Рисунок 1 – Розташування реперних точок по довжині прутка з різними температурами нагрівання: сталь 35ГС – 1-297°C; 2-291°C; 3-310°C; 4-322°C; 5-296°C; 6-312°C, а також сталь 25Г2С - 1-310°C; 2-247°C; 3-261°C; 4-302°C; 5-292°C; 6-281°C

Електроннофрактографічні дослідження провели на скануючому мікроскопі „Novosan”.

Таблиця 1 – Тріщиностійкість досліджуваних сталей в шести точках виміряних температур

№ точки	Маркування сталей	Температура, °С	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	Тріщиностійкість $K_{1C}$ , МПа $\sqrt{м}$
1	2	3	4	5	6
1	Сталь 35ГС пруток Ø14мм. (А400)	297	860	1050	196
2		291	850	1000	196
3		310	870	1000	168
4		322	820	980	156
5		296	870	1000	183
6		312	850	1030	187
1	Сталь 25Г2С пруток Ø12мм. (А800)	310	1050	1360	312
2		247	1100	1420	303
3		261	1060	1350	266
4		302	1050	1360	273
5		292	1100	1370	288
6		281	1080	1310	272

Примітка: Значення  $K_{1C}$  (стовпець 6) характеризує середньоарифметичне після випробування розтягом трьох циліндричних зразків з кільцевою тріщиною ( $D=10\text{мм}$ ;  $d_{тр}=8\text{мм}$ ;  $L=100\text{мм}$ ) для кожної точки виміряних температур, див. стовпчики 1; 3 відповідно.

Характерні фрактограми поверхні руйнування поперек прокату для арматурної сталі 35ГС, одержані після випробувань розтягом при різних температурах, виміряних по довжині прутка Ø14мм у шести точках, показані на рис.2. Як видно із фото (рис.2, а, б, в, г), крайні ліві і центральні точки 1, 6, 2, 5, (рис.2), які витримали температури нагрівання 297, 312, 291 і 296°С відповідно по довжині прутка, тут поверхні зламу мають мікроструктуру проміжного перетворення у вигляді бейніту з розташованими дрібними частинками карбідів (темних плям), тобто квазів'язкий характер руйнування з однорідними дрібними ямками, що свідчать про виникнення мікропор біля карбідних частинок структури. Підтвердженням цього – практично стабільні значення тріщиностійкості  $K_{1C}=196\dots183 \text{ МПа}\sqrt{м}$ , для цих точок перерізу прутка (див табл.1).

Що стосується фрактограм поверхонь руйнування, одержаних для крайніх правих частин прутка, (точки 3 і 4 рис.1), які витримали температури нагрівання 310 і 322°С відповідно (див. фото рис. 2, д, е), то можна сказати, що їхні поверхні зламу мають мікроструктуру голкового мартенситного бейніту з наявністю гранулярних темних плям і характерних сульфідів MnS, а також карбідів з неметалевими включеннями, оскільки у хімічному складі сталі присутні домішки сірки і фосфору заданого співвідношення. Тут маємо квазікрихке руйнування з неоднорідними глобулярними ямками та гладкими площинами розшарування, що підтверджується значним зниженням тріщиностійкості  $K_{1C}=168\dots156 \text{ МПа}\sqrt{м}$ , для цих точок перерізу прутка (див. табл.1).

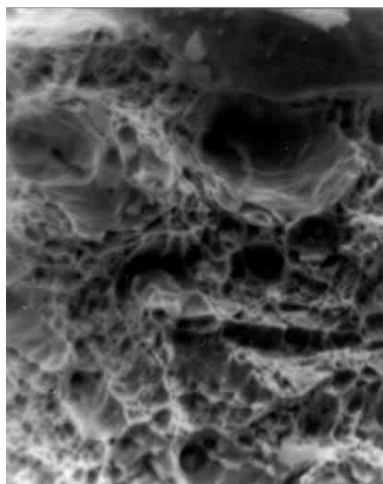
У випадку досліджень зламів, підготовлених для цієї марки сталі вздовж прокату по довжині прутка з різними температурами нагрівання для шести точок (рис.1), то тут одержані фрактограми поверхонь руйнування (рис.3, а, б, в, г, д, е) мають аналогічну структуру, що і для поверхонь руйнування поперек прокату (рис.2, а, б, в, г, д, е). Відмінність полягає лише в тому, що для шести точок перерізів структура має

збільшені розміри зерен і ямок (темні плями) карбідів як для бейнітної структури, так і для голкового мартенситного бейніту і наявних сульфідів та неметалевих включень (див. фото на рис.3, рис.1 т.т. 1–6), які відповідають температурам нагрівання 297; 291; 310; 322; 296; 312 °С.

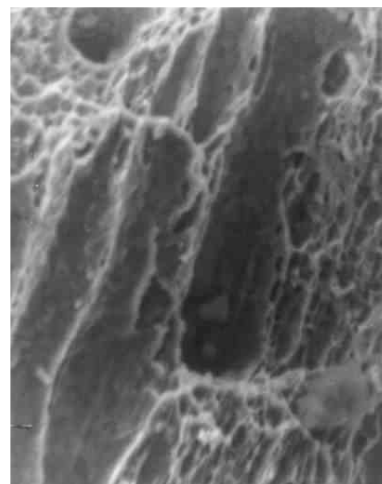
Дещо іншу картину процесів руйнування характеризують фрактограми поверхонь руйнування поперек прокату для арматурної сталі 25Г2С, одержані після випробувань розтягом зразків вищенаведених розмірів, вирізаних по довжині прутка  $\varnothing 12\text{мм}$  і вимірних температурах у шести точках прутка, які показані на рис.4. Для цієї сталі, крайні ліві і центральні точки 1, 6, 2, 5 (рис.1), які витримали температури нагрівання 310; 281; 247 і 292 °С, маємо фрагментовану феритно-аустенітну матрицю, з меншою кількістю ямок незначних розмірів, які засвідчують квазікрихке руйнування більш однорідної структури, характерної для низькотемпературного бейніту з рівномірним розподілом малих дисперсних карбідних частин та незначних включень (див. фото рис.4, а, б, в, г). Як наслідок – практично стабільні значення тріщиностійкості  $K_{1C}=312\dots 288\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$  для вказаних точок перерізу прутка (див. табл.1).

Що стосується фрактограм поверхонь руйнування, одержаних для крайніх правих частин прутка точки 3 і 4 (рис. 1), які витримали температури нагрівання 261 і 302 °С по довжині прутка відповідно, (див. рис. 4, д, е) то можна сказати, що їхні поверхні зламу мають більшу кількість ямок з окремими площинами гладкого розшарування, тобто мікроструктуру голкового низькотемпературного бейніту з характерними глобулярними (карбідними) частинками, що підтверджується зниженням тріщиностійкості  $K_{1C}=273\dots 266\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ , визначеними для цих точок перерізу прутка (див. табл. 1).

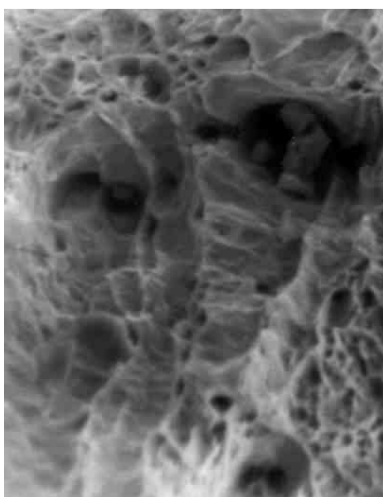
Досліджуючи злами для цієї ж марки сталі вздовж прокату по довжині прутка з різними температурами нагрівання для шести точок (рис.1), з'ясували, що тут одержані фрактограми (див. фото рис.5, а, б, в, г, д, е) також мають аналогічну структуру, що і для поверхонь руйнування поперек прокату (див. фото рис.4, а, б, в, г, д, е), правда, з деякою відмінністю, яка полягає у збільшенні розмірів зерен і ямок (темних плям) як бейнітної структури, так і дрібнозернистого голкового бейніту з наявними сульфідами MnS (див. фото на рис.5, рис.1 т.т.1–6), які відповідають температурам нагрівання 310; 247; 261; 302; 292; 281 °С відповідно.



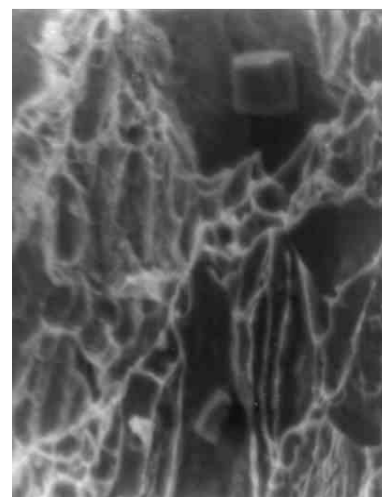
a) T1  $t=297^{\circ}\text{C}$



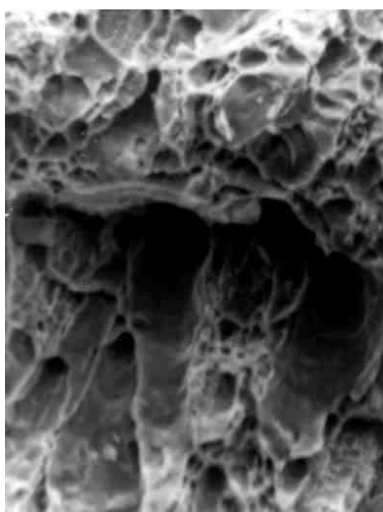
б) T6  $t=312^{\circ}\text{C}$



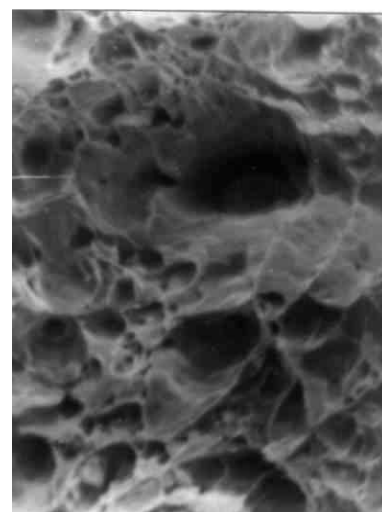
в) T2  $t=291^{\circ}\text{C}$



з) T5  $t=296^{\circ}\text{C}$

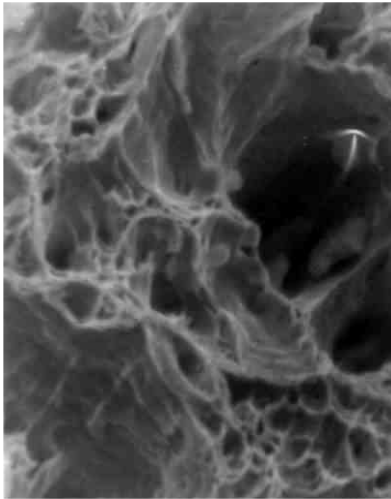


д) T4  $t=322^{\circ}\text{C}$

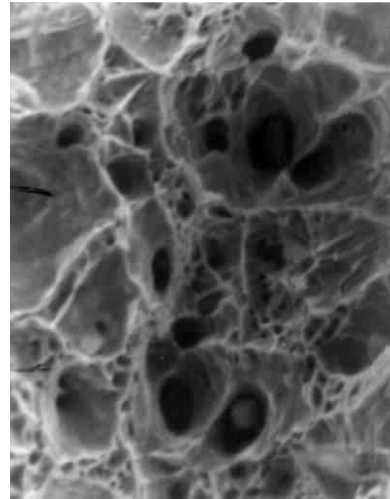


е) T3  $t=310^{\circ}\text{C}$

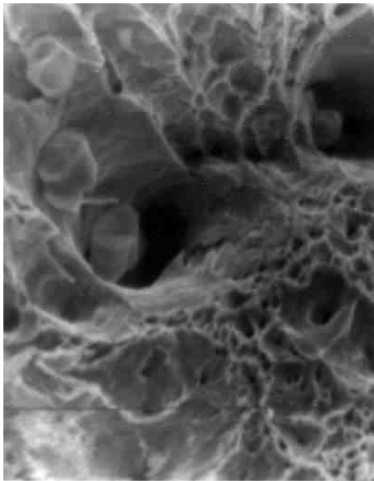
Рисунок 2 – Мікрофрактограми поперек прокату для сталі 35ГС після випробувань арматурних прутків на розтяг за підвищених температур (2500)



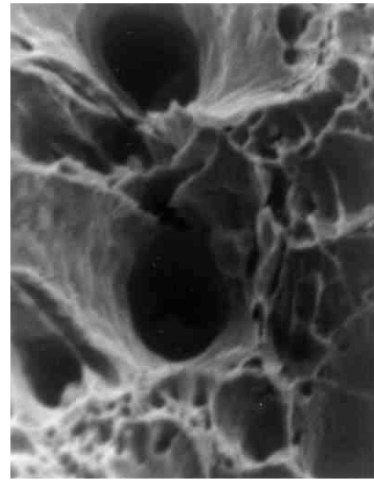
a) T1  $t=297^{\circ}\text{C}$



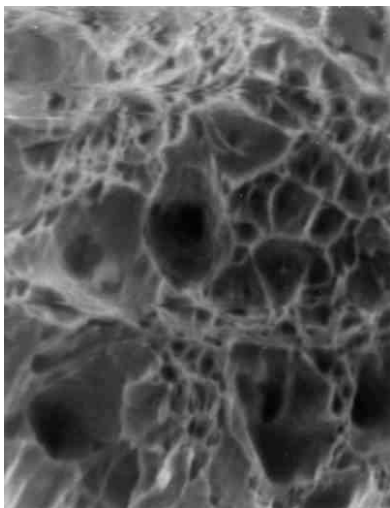
б) T6  $t=312^{\circ}\text{C}$



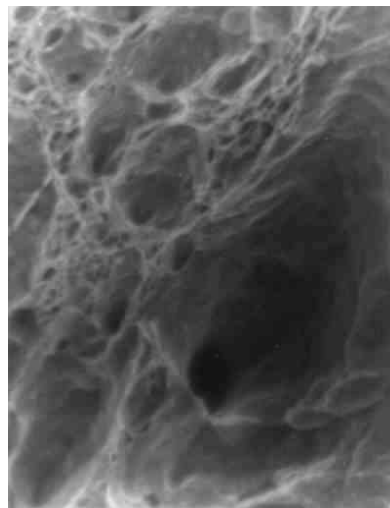
в) T2  $t=291^{\circ}\text{C}$



г) T5  $t=296^{\circ}\text{C}$

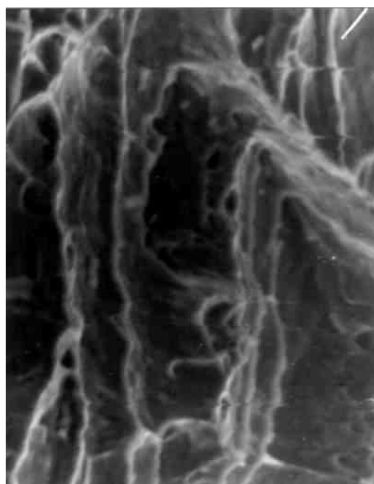


д) T4  $t=322^{\circ}\text{C}$

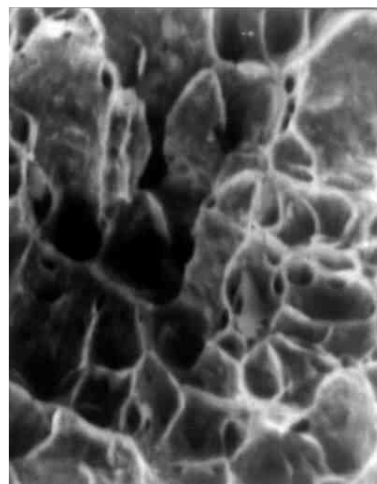


е) T3  $t=310^{\circ}\text{C}$

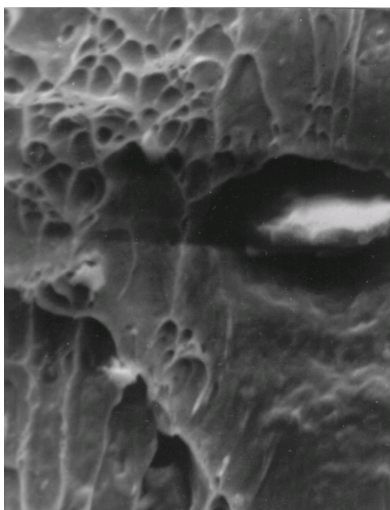
Рисунок 3 – Мікрофрактограми вздовж прокату сталі 35ГС після випробувань арматурних прутків на розтяг за підвищених температур (2500)



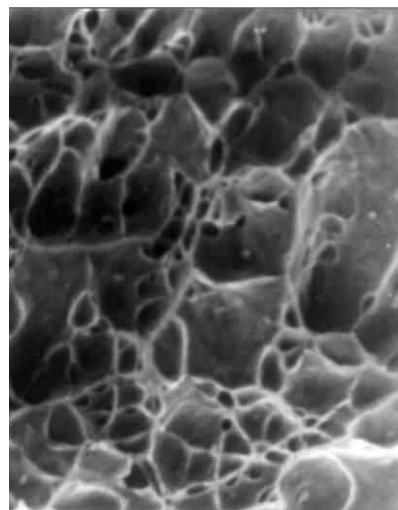
a) T1 t=310°C



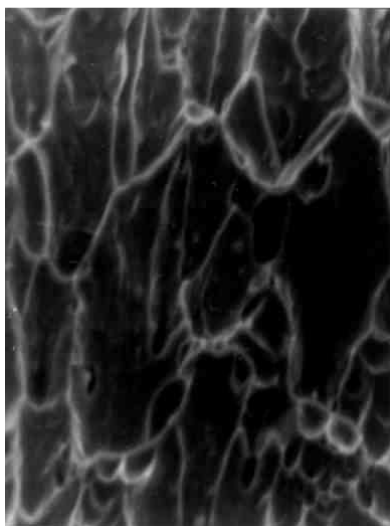
б) T6 t=281°C



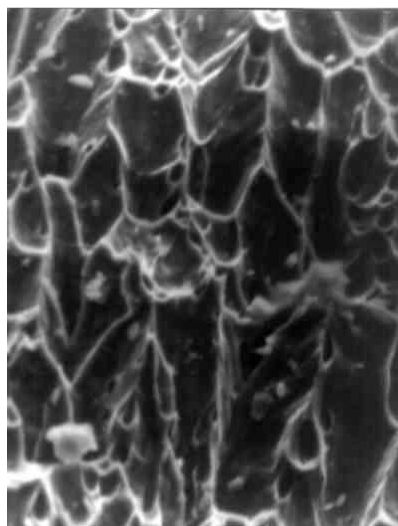
в) T2 t=247°C



г) T5 t=292°C



д) T4 t=302°C

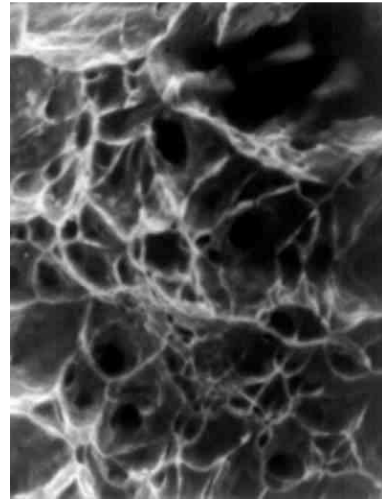


е) T3 t=261°C

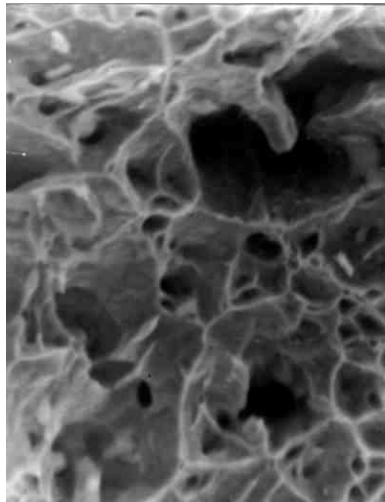
Рисунок 4 – Мікрофрактограми поперек прокату сталі 25Г2С після випробувань арматурних прутків на розтяг за підвищених температур (2500)



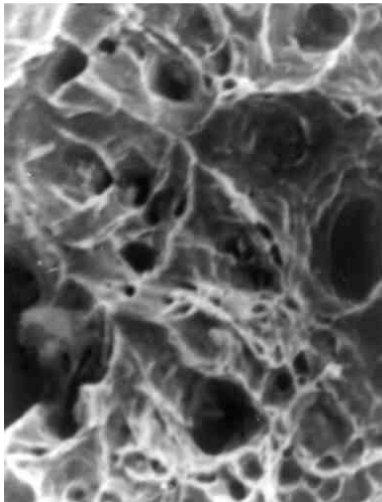
a) T1  $t=310^{\circ}\text{C}$



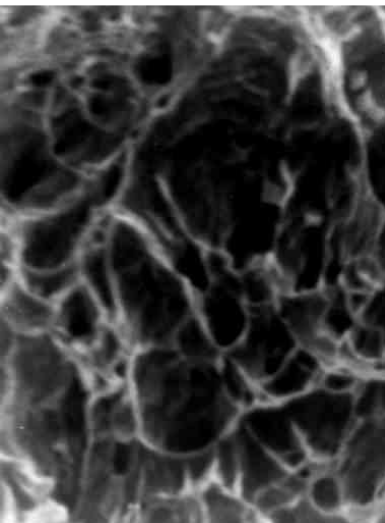
б) T6  $t=281^{\circ}\text{C}$



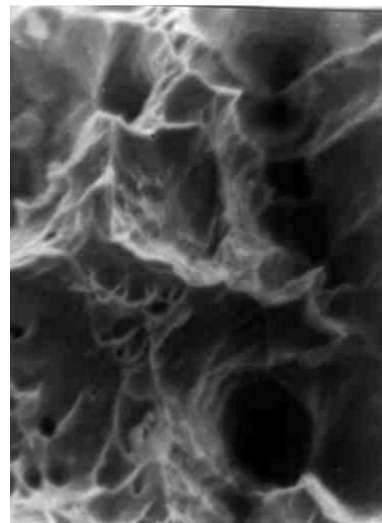
в) T2  $t=247^{\circ}\text{C}$



г) T5  $t=292^{\circ}\text{C}$



д) T4  $t=302^{\circ}\text{C}$



е) T3  $t=261^{\circ}\text{C}$

Рисунок 5 – Мікрофрактограми вздовж прокату сталі 25Г2С після випробувань арматурних прутків на розтяг за підвищених температур (2500)



За матеріалами фактографічних досліджень арматурних сталей 35ГС і 25Г2С можна зробити такі **висновки**:

1. Встановлено, що вирішальну роль у процесах руйнування сталей 35ГС і 25Г2С за умов попереднього електронагрівання та деформування розтягом арматурних прутків відіграє наявність великої кількості вогнищ зародження тріщини за рахунок неоднорідного скупчення карбідних частинок, що характерно для утвореного голкового мартенситного бейніта, цьому відповідає „провал” тріщиностійкості  $K_{IC}$ , встановленої для заданої точки по довжині прутка (див.т.т.Зтабл.1) незалежно від марки досліджуваної сталі; при цьому контрастніша його вираженість істотніше сформована у сталі 35ГС, ніж у сталі 25Г2С для фіксованих температур цих точок.
2. Що стосується порівняння досліджуваних сталей за тріщиностійкістю ( $K_{IC}$ ), то сталь 25Г2С має більші значення  $K_{IC}$  у всіх точках вимірних температур по довжині прутка, ніж сталь 35ГС для цих же точок, що можна пояснити більшим вмістом вуглецю, сірки, фосфору та оксидів на їх основі, які приводять до окрихчення останньої. З другого боку, більш енергоємний характер мікрів'язкого руйнування сталі 25Г2С з невеликою кількістю однорідних ямок зумовлений рівномірним розподілом структурних складових, зменшенням кількості та розмірів карбідних частинок і неметалевих включень за рахунок збільшеного вмісту Mn у цій сталі.
3. Застосування електронної фрактографії для вивчення рельєфу поверхні руйнування дає можливість якісного ранжування структурних змін у досліджуваних арматурних сталях; на цій основі рекомендувати для підвищення тріщиностійкості  $K_{IC}$  в місцях її зниження по довжині прутка запобігання утворенню структури голкового мартенситного бейніту з урахуванням попереднього електронагрівання та деформування розтягом.

#### **Література**

1. Панасюк В.В. Механика квазіхрупкого розрушення материалов. – К.: Наукова думка, 1991. – 415с.
2. Когут Н.С. Трещиностойкость конструкционных материаллов. - Львов: Вища школа, 1986. –160с.
3. Когут Н.С., Шахматов М.В., Ерофеев В.В. Несущая способность сварных соединений. - Львов: Світ, 1991. – 184с.
4. Касаткин Б.С. Структура и микромеханизм хрупкого разрушения стали. - К.: Техника, 1968. – 258с.
5. Применение электронной микроскопии. – М.: Металлургиздат, 1957. – 327с.
6. Романів О.М., Зима Ю.В., Карпенко Г.В. Електронна фрактографія зміцнених сталей. - К.: Наукова думка. 1974. – 207с.
7. Spitzig W.A. – У кн.: Electron Microfractogr. Sumpos. 1st Ann. Met. Amer. Soc. Test and Mater., San Francisco, Calif., 1968, Philadelphia, Pa., 1969.
8. Williams M.L., Bouer R.R., Blackburn M.J. – У кн.: Electron Microfractogr. Sumpos. 1st Ann. Met. Amer. Soc. Test and Mater., San Francisco, Calif., 1968, Philadelphia, Pa., 1969.
9. Изоттов В.Н., Тишаев С.Н., Дабаткина М.М. Структура вырожденно перлита и ее влияние на механические свойства малоуглеродистой низколегированной стали // Физика металлов и металловедение, 1991. – №10. – С.38–45.
10. Даль В., Антон В. Статическая прочность и механика разрушения сталей. – М.: Металлургия, 1986. – 278с.
11. Ясній П.В. Пластично-деформовані матеріали: втома і тріщинотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 292с.
12. Ясній П.В., Ващенко О.В., Гуцайлюк В.Б. Прогнозування впливу історії навантаження на опір крихкому руйнуванню теплотривких сталей // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 1998. – Т.3. - №3. – С.157-163.
13. Ясній П.В., Гуцайлюк В.Б. Прогнозування впливу попереднього циклічного пружнопластичного деформування сталі 15Х2МФА // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2000. – Т.5. - №4. – С.5-10.
14. Жуковец І.К. Механические испытания материаллов. – М.: Высшая школа, 1980. – 191с.

*Одержано 12.05.2008 р.*