

НЯКОИ АСПЕКТИ НА ТЕРМИЧНАТА ОБРАБОТКА НА ОТЛИВКИ ОТ СПЛАВ EN AC AlSi7Mg

SOME ASPECTS OF THE HEAT TREATMENT OF EN AC AlSi7Mg CASTINGS

Ст.н.с. Росица Ковачева
Институт по металознание "А. Балевски" – БАН, София, България
E-mail: rosi@ims.bas.bg

Резюме Разгледани са подробно всички етапи на термичната обработка и влиянието им върху микроструктурата и механичните свойства на ляти автомобилни колела от сплав EN AC AlSi7Mg, като са използвани изследвания върху реални отливки, получени в условията на редовно производство. Изследвани са 6 типоразмера колела в лято и термообработено състояние при различни комбинации от режими на хомогенизация и стареене. Проведени са количествени и високотемпературни металографски изследвания. Установено е, че температурата на хомогенизация може да бъде повишена до 545°C, а продължителността на задържане – намалена до 4 часа при гарантирано добри якостни и пластични свойства.

KEY WORDS: ALUMINIUM ALLOYS, HEAT TREATMENT, METALLOGRAPHY

1. Увод

Решаващо значение за постигане на добра комбинация от механични и пластични свойства на отливки от сплав EN AC AlSi7Mg има термичната обработка, която се състои обикновено от хомогенизация, закалка и следващо стареене [1-10].

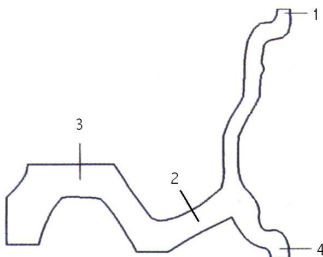
В настоящата разработка са разгледани подробно всички етапи на термичната обработка и влиянието им върху микроструктурата и механичните свойства на ляти автомобилни колела от сплав EN AC AlSi7Mg, като са използвани изследвания върху реални отливки, получени в условията на редовно производство.

2. Експериментална част

За изследванията са използвани заготовки за автомобилни колела, отлети от сплав EN AC AlSi7Mg по метода за леене с противоналягане, които поради сложната

конфигурация и високите експлоатационни изисквания към тях представляват особен интерес за изучаване. Химическият състав на изследваните отливки е в следните граници: (тегл.%): 6.8- 7.2 Si, 0.33-0.37 Mg, 0.12-0.14 Fe, 0.12-0.13 Ti и 0.016-0.018 Sr. Фазовият състав на изследваната сплав е: α -твърд разтвор, евтектикум от α +Si, интерметалните съединения $Al_9Fe_2Si_2$, $Al_8Si_6Mg_3Fe$ и уякчаващата фаза Mg_2Si .

Изследвани са 6 различни типоразмера автомобилни колела, които обхващат широка гама конфигурации с различни съчетания на тънки и дебели сечения: 14x6; 15x8; 16x7; 15x10; 16x6; 17x8. Колелата са изследвани в лято състояние и след термична обработка, която включва различни комбинации от хомогенизация и стареене: хомогенизация при 535°C/4h, 5h, 6h; 540°C/4.5h, 5h; 545°C/4h, 5h; 550°C /5h, закалка и стареене при 160°C/4 h; 170°C/2.5h, 3h; 180°C/2h, 2.5h, 4h [9, 10].



Фиг.1 Напречно сечение на автомобилното колело с обозначение на изследваните области: 1-вътрешен реборд, 2-ребро, 3-главина, 4-външен реборд

Микроструктурата е изследвана в 4 характерни сечения на колелата: вътрешен реборд, ребро, главина и външен реборд – фиг.1. С помощта на софтуер за количествена оценка на изображението Olympus MicroImage са измервани площта, периметъра и закръглеността на Si- частици в лято [11-13] и термообработено състояние. Посредством високотемпературна металография е проследено изменението на морфологията на Si- частици в процеса на нагряване до 530°C и задържане при тази температура в продължение на 10, 15, 30, 45 и 60 минути. Използвана е високотемпературна вакуумна камера Vacutherm към металографски микроскоп Reichert MeF2 за директно наблюдаване в процеса на нагряване и охлаждане [11, 14].

Образци за определяне на механичните свойства: якост на опън (R_m), условна граница на провлачване ($R_{0.2}$), относително удължение (A) и твърдост по Бринел (HB) са приготвени от главините на колелата. Стойностите за показателите са средно аритметични от изпитването на 10 образца.

3. Резултати и дискусия

Известно е, че през време на хомогенизацията се извършва изравняване на концентрациите в α -твърдия разтвор, промяна в морфологията на Si-частици и разтваряне на уякчаващата фаза Mg_2Si в твърдия разтвор. През време на

стареенето тази фаза се отделя в дисперсен вид в твърдия разтвор и предизвиква повишаване на якостните показатели и намаляване на пластичността.

3.1. Хомогенизация

3.1.1 Хомогенизиране на твърдия разтвор

Установено е [1], че в Al-Si-Mg леярски сплави степента на кристална ликвация на Si и Mg е ниска, което позволява хомогенизацията на твърдия разтвор да бъде напълно завършена още в първите 30 минути на нагриване до 550 °C.

3.1.2 Изменение на морфологията на Si-частици

Морфологията на евтектичните Si-частици определя в много голяма степен механичните свойства на AlSi7Mg сплави [12]. Частици с едра иглообразна форма представляват концентратори на напрежения и иницират поява на пукнатини, което влошава механичните свойства. Хомогенизиращото отгряване, наред с модифицирането със стронций, цели получаването на закръглени Si-частици с малки размери, които имат благоприятно влияние върху свойствата.

Според редица изследователи [2-5] през време на хомогенизацията изменението на морфологията на Si- частици преминава през няколко етапа. Първоначално Si- частици се разделят на по-малки фрагменти, след което постепенно се закръгляват и при по-продължително отгряване се уедряват. Скоростта на сфероидизация зависи от едрината на частиците – тя е по-висока при по-ситни частици. Затова в модифицираните сплави, каквато е изследваната, закръгляването на Si- частици е ускорено.

Формата и размерите на Si-частици в различните сечения на автомобилните колела се различават значително, тъй като зависят от скоростта на кристализация, която до голяма степен се определя от конфигурацията на отливката [13].

В таблица 1 са представени резултатите от измерванията на параметрите на Si- частици преди и след термична обработка [11]. На фиг.2 и 3 са показани микроструктурите в четирите изследвани сечения на автомобилно колело типоразмер 14x6 в лято състояние и след термична обработка при режим 3 от табл.2.

Вижда се, че в резултат на термичната обработка относителните разлики между измерените максимална и минимална стойности на параметрите на Si- частици в различните сечения намаляват. Установява се закръгляване и уедряване на Si- частици: в тънките сечения на отливката уедряването е много интензивно поради коалесценция на малките по размери и в голямо количество частици в лято състояние; в дебелия сечения превес има процесът на закръгляване, а уедряването протича по-бавно поради първоначалната фрагментация. След термична обработка се наблюдава тенденция към уеднаквяване на размерите и формата на Si- частици в различните сечения и получаване на равномерна микроструктура в цялата отливка.

Таблица 1. Геометрични параметри на Si-частици

Сечение	Площ а, μm^2		Периметър р, брой точки от контура		Закръгленост, $r^2/4\text{a}$	
	Лято	След ТО	Лято	След ТО	Лято	След ТО
Вътрешен реборд	0.93	4.71	55.23	122.68	1.47	1.29
Ребро	1.99	5.58	89.00	129.74	1.58	1.33
Главина	2.11	5.97	80.60	123.00	1.60	1.31
Външен реборд	1.13	5.29	67.48	123.69	1.48	1.30
Относителна разлика, % $\frac{\text{max}-\text{min}}{\text{max}} \times 100$	55.9	21.1	37.9	5.4	8.1	3.0

Проведените високотемпературни металографски изследвания на Si- частици в ребордите и главината (фиг. 4 и 5) установяват [11, 14], че още след 15 min отгряване се наблюдава сфероидизация на ситните закръглени частици в ребордите (фиг. 4б), докато в главината все още протича процес на фрагментация (фиг. 5б). През следващите 30 min настъпва коалесценция на

съседни частици (фиг.4в и 5в) и уедряване при по-нататъшно задържане до 45 и 60 min при температурата на хомогенизация (фиг.4г и 5г). Такива кратки времена на изменение на морфологията на Si- частици са установявани и от други автори. Според [1] закръгляване се наблюдава след 10 min отгряване, [3]

съобщава за пълна сфероидизация след 25 min отгряване, а [4] - след 30 до 60 min.

3.1.3. Разтваряне на уякчаващата фаза в твърдия разтвор

Проведените до тук изследвания, както и литературните данни, показват, че 45 - 60 min отгряване при температурата на хомогенизация 540°C са напълно достатъчни за завършване процесите на изравняване на концентрациите в твърдия разтвор и за благоприятно изменение на морфологията на евтектичните Si-частици. Това позволява времето за хомогенизация да бъде намалено, ако и процесът на разтваряне на уякчаващата фаза Mg_2Si може да се осъществи за по-кратък период от време.

Известно е [1], че за да се получи максимално количество разтворена уякчаваща фаза в твърдия разтвор за най-кратко време, температурата на хомогенизация трябва да бъде възможно най-близка до евтектичната (562°C). Според [4] при 560°C настъпва стопяване по границите между зърната. Наблюденията са показали, че начало на стопяване по границите между зърната, както и локални стопявания на малки области, състоящи се от сложни евтектикуми, настъпва при температури, много по-ниски от евтектичната.

Стопяването може да се установи само чрез металографско изследване.

Високотемпературните металографски изследвания, проведени при температури до 545°C, не установиха стопявания по границите между зърната, нито локални стопявания в евтектични микрообеди. Металографските изследвания на образци от хомогенизираните при различни условия автомобилни колела също не установиха стопявания.

Механичните свойства на автомобилни колела, хомогенизирани при различните режими и подложени на едно и също стареене - 160°C/4h, не се различават съществено. Това показва, че наистина в рамките на тези температури и времена на хомогенизация, е осъществено разтваряне на достатъчно количество уякчаваща фаза Mg_2Si в твърдия разтвор и механичните свойства на отливките по-нататък ще зависят единствено от условията на стареене.

Всичко това доказва, че температурата на хомогенизация би могла да бъде повишена до 545°C, а времетраенето – намалено до 4 часа, което би намалило до голяма степен производствените разходи. Това, разбира се, изисква много прецизно регулиране на температурата в пещта за хомогенизация.

Някои автори предлагат нестандартни методи на хомогенизация. В [3] е описан метод, наречен “опростена хомогенизация”, който се състои в следното: отливката се изважда от формата веднага след завършване на кристализационния процес, когато температурата ѝ е все още близка до евтектичната, и се закалява. По този начин се запазва количеството разтворена в твърдия разтвор уякчаваща фаза. Тъй като съществува опасност от големи изкривявания на детайла, методът е подходящ само за отливки с проста конфигурация. При тях този метод може успешно да замени същинската хомогенизация.

3.2. Закаляване

Препоръчва се закаляването да се извърши в течение на интервал от 10 до 30 s след изваждането от пещта за хомогенизация при температури на охлаждащата вода от 25 до 70°C [1]. Установено е [8], че скоростта на отделяне на уякчаващата фаза е изключително висока в температурния

интервал 250 - 400°C, където отделянето започва след един инкубационен период от 30 - 60 s. Ето защо се налага отливката да бъде охладена много бързо преди достигането на този температурен интервал, т.е. максимум до 30 s след изваждането от пещта за хомогенизация. Счита се, че така се осигурява по-голямо удължение и по-висока ударна якост на отливките.

Необходимо е също така водата във водния контейнер да се разбърква интензивно, за да се избегне образуването на въздушни джобове, които намаляват скоростта на охлаждане.

Закалката при настоящите изследвания е извършена във вода с температура около 70°C, като времето между излизането на отливките от пещта за хомогенизация и потопяването им във водния контейнер, е по-малко от 20 s.

3.3. Предварително стареене

Под предварително стареене се разбира задържането на закалените отливки при температури, по-ниски от температурата на изкуственото стареене. На практика то представлява естествено стареене на отливките в периода от закалката до поставянето им в пещта за изкуственото стареене.

Според [1] предварителното стареене може да предизвика понижаване на якостта на опън и границата на провлачване за сметка на нарастване на удължението с увеличаване на продължителността на престоя при стайна температура. То е особено интензивно в първите 3 часа и е по-ясно изразено при повишени съдържания на Mg. Различните автори препоръчват различни времена на предварително стареене – от 2 до 48 часа. Изтъква се, обаче, че колкото по-висока е температурата на изкуствено стареене, толкова по-несъществени ще са разликите в механичните показатели на предварително старели и нестарели отливки.

Колела, типоразмер 15x8, са задържани при стайна температура в продължение на 2, 6, 12 и 24 часа след закаляването и след това са подложени на изкуствено стареене в продължение на 4 часа при 160 °C. Установява се, че механичните свойства в отделните сечения не се различават съществено след различните времена на предварителното стареене. Ето защо времето на задържане на отливките при стайна температура след закалката се определя предимно от производствения цикъл.

3.4. Стареене

Както вече беше споменато, през време на стареенето фазата Mg_2Si се отделя в дисперсен вид в твърдия разтвор и предизвиква повишаване на якостните показатели и намаляване на пластичността.

Определящи за получаване на подходяща комбинация от якостни и пластични свойства са температурата и продължителността на стареене.

При правилно избран режим на стареене (температура и време на задържане), се получават максимално високи якостни и пластични механични показатели, т.е. стареенето е “пълно”. Това е практиката при режим T6.

В случай, че стареенето води до повишаване на якостта на опън и твърдостта и намаляване на удължението, стареенето се обозначава като “недостатъчно (непълно)” – това е практиката при режим T5.

Ако якостните и пластични свойства намаляват едновременно, режимът води до “престаряване” на сплавите.

Таблица 2. Механични свойства на изследваните колела

Състояние	R _m , МПа	R _{0,2} , МПа	A, %	НВ
1(лято)	175.8	107.6	5.3	54
2(540°C/5h)	219.9	122.7	11.3	61
3(+160 °C/4h)	272.3	218.6	6.4	95
4(+170 °C/2,5h)	287.2	228.9	5.4	97
5(+170 °C/3h)	297.9	252.3	4.4	107
6(+180 °C/2h)	295.1	230.3	5.8	98
7(+180 °C/2.5h)	296.1	235.1	5.0	98

От таблица 2 може да се проследи изменението на механичните свойства на колело типоразмер 15x8, определени за 7 състояния на отливките: лято (състояние 1), след хомогенизация 5 часа при 540°C и закалка (състояние 2), както и след термична обработка, състояща се в хомогенизация 5 часа при 540°C и закалка и 5 режима на стареене при различни температури и времена (състояния от 3 до 7).

4. Заключение

От направените проучвания и изследвания се установява, че закръгляването на Si- частици и разтварянето на уякчаващата фаза Mg₂Si са едни от най-важните задачи на хомогенизацията на заготовки за автомобилни колела, отлети от модифицирана със Sr сплав AlSi7Mg.

Измененията в морфологията на Si- частици протичат за времена от 15 до 30 min задържане при температурата на хомогенизация.

Високотемпературните металографски изследвания, проведени при температури до 545°C, не установяват стопявания по границите между зърната, нито локални стопявания в евтектични микрообеди.

5. Литература

1. Apelian D., S. Shivkumar, G. Sigworth, AFS Transactions, 1989, 137, 727-742
2. Shivkumar S., S. Ricci, Jr., B. Steenhoff, D. Apelian, AFS Transactions, 1989, 138, 791-810
3. Shivkumar S., S. Ricci, Jr., D. Apelian, AFS Transactions, 1990, 180, 913-922
4. Zhu P. Y., Q. Y. Liu, T. X.. Hou, A. Arbor, AFS Transactions, 1985, 95, 609-614
5. Tuttle M. M., D. L. McLellan, AFS Transactions, 1982, 76, 13-23
6. Lazarova-Mancheva R., R. Kovacheva, Scientific Proceedings of the Scientific Technical Union of Mechanical Engineering, Sofia, Bulgaria, V(1998), 6(28), 23-28
7. Drouzy M., S. Jacob, M. Richard, AFS International Cast Metals Journal, 1980, 6, 43 – 50
8. Shivkumar S., C. Keller, D. Apelian, AFS Transactions, 1990, 179, 905 – 911

Вижда се, че повишаване на температурата на стареене с 10 до 20°C дава възможност времетраенето на стареенето да се намали почти наполовина (режими 3 до 7), като стойностите за якостните показатели се подобряват при леко намаление на пластичността.

Режими 3 и 6 са в диапазона на пълното стареене, а всички останали - в областта на недостатъчното (непълно) стареене.

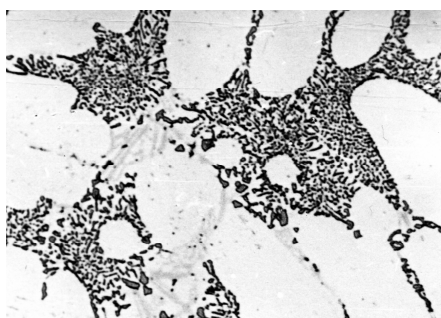
Следователно температурата на хомогенизация може да бъде повишена до 545°C, а продължителността на задържане - намалена до 4 часа.

Препоръчва се закаляването да се извърши в течение на интервал от 10 до 30 s след изваждането от пещта за хомогенизация при температури на охлаждащата вода от 25 до 70°C.

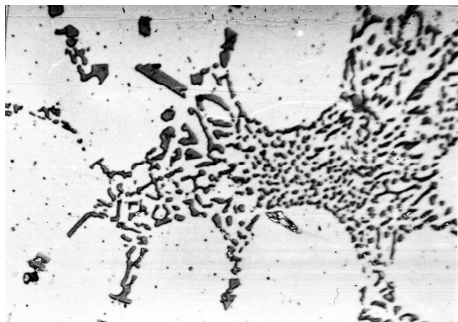
Предварителното стареене с различна продължителност не оказва съществено влияние върху механичните свойства на отливките.

Изборът на подходящ режим на стареене е решаващ за получаване на добра комбинация от якостни и пластични свойства. Времето на стареене може да бъде намалено наполовина при повишаване на температурата на стареене само с 10°C, като се запази нивото на механичните свойства.

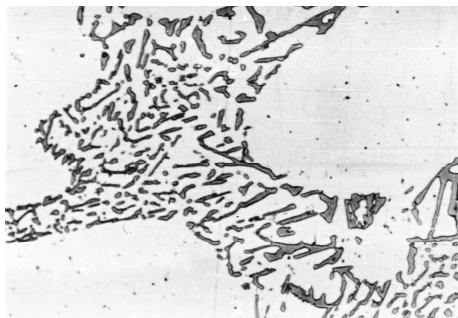
9. Kovacheva R., Scientific Proceedings of the Scientific Technical Union of Mechanical Engineering, Sofia, Bulgaria, IX(2002), 1(57), 150-153
10. Kovacheva R., Scientific Proceedings of the Scientific Technical Union of Mechanical Engineering, Sofia, Bulgaria, XII(2005), 4(82), 30-31
11. Kovacheva R., R. Lazarova, Scientific Proceedings of the Scientific Technical Union of Mechanical Engineering, Sofia, Bulgaria, XI(2004), 5(73), 113-116
12. Kovacheva R., I. Katzarov, R.Lazarova – Mancheva, G. Bachvarov, Aluminium, 77 (2001), 4, 224 - 228
13. Lazarova-Mancheva R., R. Kovacheva, G. Bachvarov, V. Manolov, Practical Metallography, 39 (2002), 1, 28-35
14. Kovacheva R., R. Lazarova, Scientific Proceedings of the Scientific Technical Union of Mechanical Engineering, Sofia, Bulgaria, XI(2004), 1(69), 167-170



а



б

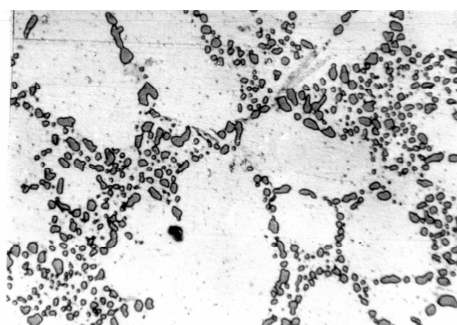


в

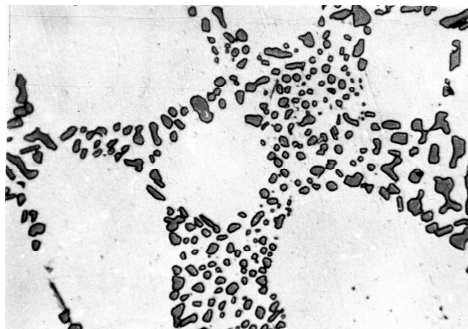


г

Фиг. 2. Микроструктура на изследваните сечения в лято състояние, х 500: а) вътрешен реборд; б) ребро; в) главина; г) външен реборд



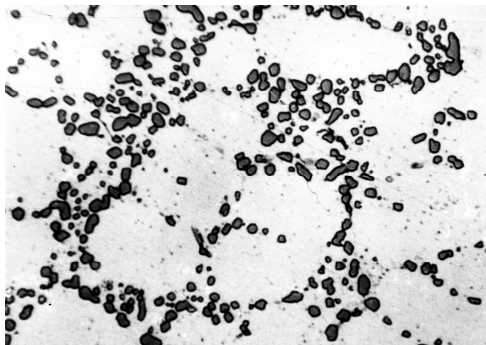
а



б

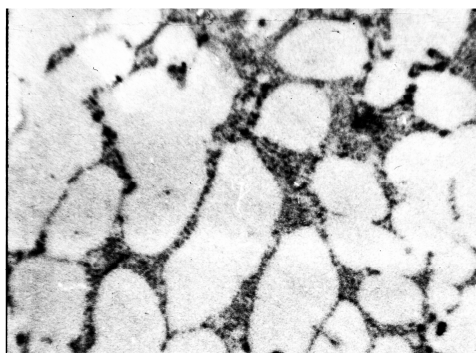


в

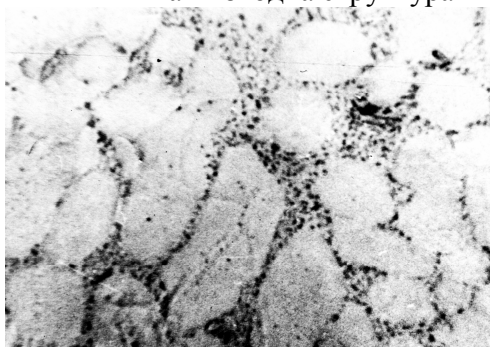


г

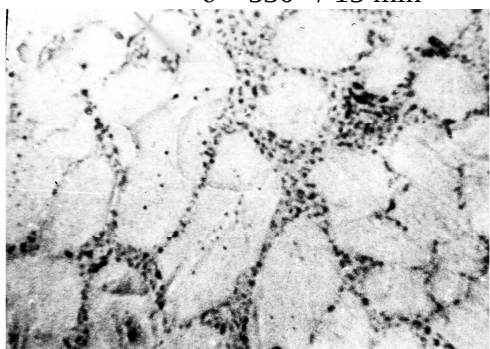
Фиг. 3. Микроструктура на изследваните сечения след термична обработка, х 500: а) вътрешен реборд; б) ребро; в) главина; г) външен реборд



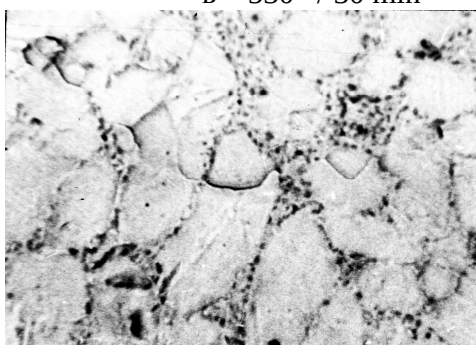
а - изходна структура



б – 530⁰ / 15 min

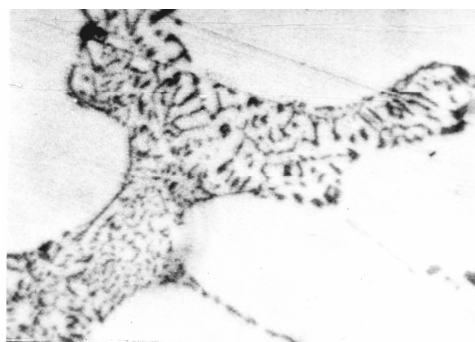


в – 530⁰ / 30 min

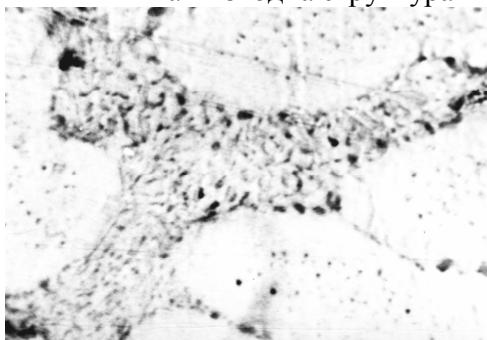


г – 530⁰ / 45 min

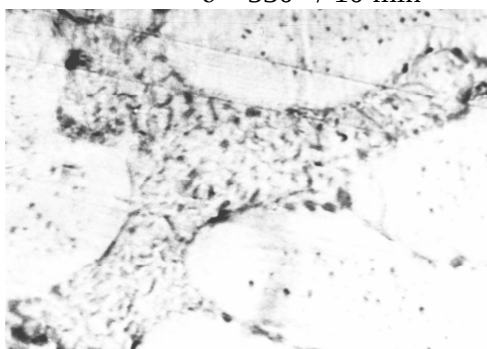
Фиг. 4 Високотемпературни металографски изследвания на вътрешен реборд на автомобилно колело, х 500



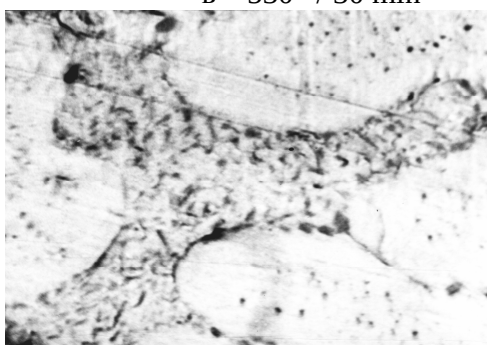
а - изходна структура



б – 530⁰ / 10 min



в – 530⁰ / 30 min



г – 530⁰ / 60 min

Фиг. 5. Високотемпературни металографски изследвания на главина на автомобилно колело, х 500