

УДК 620.18.186

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПРЕССОВАННОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ ЛАТУНИ 59Cu–3,5Mn–2,5Al–0,5Fe–0,4Ni НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ***Н. Б. Пугачева, А. В. Лебедь*Институт машиноведения УрО РАН,  
620049, Россия, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

E-mails: nat@imash.uran.ru, annalebed5@rambler.ru

*Исследовано влияние температуры горячей штамповки на структурное состояние латуни 59Cu–3,5Mn–2,5Al–0,5Fe–0,4Ni и характер разрушения блокирующих колец синхронизатора коробки передачи легкового автомобиля. Показано, что отсутствие пластичной  $\alpha$ -фазы в исследованном сплаве в сочетании с высокой температурой нагрева (780 °C) перед штамповкой приводит к межзёрённому хрупкому разрушению под действием остаточных напряжений. Снижение температуры штамповки до 700 °C при том же структурном состоянии латуни исключает растрескивание колец под действием остаточных напряжений и изменяет характер разрушения под действием изгибающей нагрузки с камневидного на ямочный.*

**Ключевые слова:** латунь, микроструктура,  $\alpha$ -фаза,  $\beta$ -фаза, силициды, блокирующее кольцо синхронизатора, разрушение, фрактография, излом, включения.

**Введение.** Создание разнообразных машин новых типов, организация их массового производства, стремление к увеличению надежности работы каждого агрегата стимулирует разработку новых и модифицирование ранее применявшихся материалов. В настоящее время во многих отраслях промышленности, в частности, в автомобилестроении, судостроении, машиностроении широко применяются латуни специального назначения. Эти сплавы помимо меди и цинка могут содержать в своем составе такие элементы, как кремний, марганец, железо, алюминий, никель, свинец и ряд других, что обеспечивает необходимый уровень не только механических, но и специальных свойств (износостойкость, коррозионностойкость и т.д.) за счет формирования многофазной структуры [1–3]. Типичным представителем таких латуней является сплав 59Cu–3,5Mn–2,5Al–0,5Fe–0,4Ni, из которого на Ревдинском заводе по обработке цветных металлов изготавливают трубы, являющиеся заготовкой блокирующих колец синхронизатора коробки передач отечественных автомобилей. Существенным недостатком сплава является склонность к растрескиванию как при хранении, так и при горячей штамповке колец. Отштампованные кольца могут растрескиваться насквозь, трещина может иметь длину примерно в половину высоты кольца или быть микроскопической, что обнаруживается при операции «прозвона» (по глухому звуку) на предприятии. Со всё возрастающим усложнением и ужесточением условий эксплуатации современной техники, в том числе и автомобилей, чрезвычайно актуальной стала проблема обеспечения достаточной надёжности всех деталей при дли-

---

*Наталья Борисовна Пугачева (д.т.н.), ведущий научный сотрудник, лаборатория микро-механики материалов.*

*Анна Владимировна Лебедь, соискатель, лаборатория микромеханики материалов.*

тельной эксплуатации. Именно поэтому в последние годы большое значение придается изучению процесса разрушения и влияния различных структурных и технологических факторов на характеристики разрушения.

Среди физических методов изучения связи состава и структуры сплавов с их механической прочностью особое место отводится исследованию поверхностей разрушения (изломов), поскольку излом наиболее четко отражает строение и свойства материала в локальном объеме, в котором протекает процесс разрушения. В ряде случаев эксплуатационных разрушений и повреждений только по излому можно сделать заключение о характере и причинах поломки или аварии [4]. Вместе с тем, несмотря на большое количество опубликованных в последние годы работ по проблеме разрушения, отсутствуют достаточно широкие исследования, полностью посвященные фрактографии, особенно цветных сплавов. Как правило, параллельно не рассматриваются особенности макро- и микростроения изломов, что затрудняет комплексное использование этой характеристики для оценки качества материала, установления причин повреждения.

Цель данной работы — исследование влияния температуры нагрева перед горячей штамповкой колец на структурное состояние латуни  $59\text{Cu}-3,5\text{Mn}-2,5\text{Al}-0,5\text{Fe}-0,4\text{Ni}$  и на характер разрушения колец после горячей штамповки.

**Материалы и методы.** Исследованы блокирующие кольца синхронизатора, изготовленные из  $(\alpha+\beta)$ -латуни ЛМцАЖН, химический состав которой в соответствии с ТУ 184550-106-033-97 «Трубы прессованные латунные для колец синхронизатора» приведён в табл. 1.

Технология изготовления блокирующих колец синхронизатора включает получение прессованных труб, которые являются заготовкой. Прессование литой заготовки проводят при  $740 \pm 20$  °С, далее — охлаждение труб на воздухе, обрезку заднего конца, правку, старение при 450 °С (3 часа), охлаждение на воздухе, подрезку заднего и переднего концов, зачистку заусенцев, продувку воздухом, протирку. Затем выполняют галтовку, обточку колец по внутренней поверхности, обезжиривание, горячую штамповку, обрубку облоя, прозвонку, термообработку.

В ходе исследования были изучены разрушенные детали (кольца) после горячей штамповки при температурах 780 и 700 °С и снятия облоя. Характеристика исследованных образцов приведена в табл. 2.

Макрофрактографические исследования поверхности трещин, образовавшихся в кольцах, проводили на бинокулярном микроскопе МБС-10 без увеличения и при двухкратном увеличении, микрофрактографические — на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU (Чехия), оснащённом системами рентгеновского волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700, энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD-детектором фирмы OXFORD (Великобритания) и программным обеспечением INCA, позволяю-

Таблица 1

**Химический состав латуни  $59\text{Cu}-3,5\text{Mn}-2,5\text{Al}-0,5\text{Fe}-0,4\text{Ni}$ , мас. %**

Основные компоненты								Примеси, не более				
Cu	Mn	Al	Fe	Ni	Si	Pb	Zn	Si	Sn	Pb	Ni	Всего
58,5–60,5	3,0–4,0	2,0–3,0	0,3–0,7	0,3–0,5	—	—	ост.	0,2	0,2	0,2	—	0,5

**Температура нагрева перед горячей штамповкой и характеристика состояния исследованных колец**

№	T, °C	Наличие трещин
1	780	Трещина на всю высоту кольца посередине канавки зуба
2	780	Забраковано по результатам «прозвона», при вырезке фрагмента образовалась трещина на всю высоту на противоположной от места приложения нагрузки стороне кольца
3	780	Кольцо прошло операцию «прозвона», было сломано путём изгиба
4	780	Кольцо не прошло операцию «прозвона», но трещин в процессе вырезки образцов не появилось, сломано путём изгиба
5	700	Кольцо прошло операцию «прозвона», было сломано путём изгиба
6	700	Кольцо не прошло операцию «прозвона», но трещин в процессе вырезки образцов не появилось, было сломано путём изгиба

щими проводить локальный химический анализ состава материала поверхности.

Эти исследования дают много ценных сведений о характерном строении и причинах возникновения различных металлургических дефектов в латунях. Применение здесь электронного микроскопа оказывается плодотворным, так как электронная фрактография, позволяющая приблизиться к пониманию микромеханизмов разрушения, является одним из звеньев связи позиций металловедения, металлофизики и механики материалов в обширной проблеме разрушения [4]. Оценку характера разрушения детали проводили в соответствии с РД 50-672-88<sup>1</sup>.

Идентификацию микроструктуры осуществляли с помощью оптического металлографического микроскопа НЕОРНОТ-21. Количественную оценку структурных составляющих сплава выполняли с помощью программного комплекса **Materials Workstation** прибора LEICA VMHT AUTO, предназначенного для структурного анализатора материалов. Данный комплекс позволяет определять следующие количественные характеристики структуры [3]: объёмную долю каждой фазы; средний размер частиц; среднее расстояние между силицидами; коэффициент анизотропии частиц.

**Результаты и их обсуждение.** Фазовый состав латуни 59Cu–3,5Mn–2,5Al–0,5Fe–0,4Ni подробно изучен в работе [2]. Основу сплава составляет  $\beta$ -фаза CuZn, по границам и в теле зёрен которой возможно выделение мелких зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора на основе Cu, кроме того, в латуни присутствует некоторое количество силицидов (Fe, Mn)<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Исследования структуры показали, что в сплаве деталей № 1 и № 2  $\alpha$ -фаза полностью отсутствует, что, конечно же, способствует растрескиванию по границам зёрен под действием сформировавшихся при штамповке внутренних остаточных напряжений.

По химическому составу сплавы деталей № 1 и № 2 полностью соответствует марочному составу исследованной латуни: содержание свинца — 0,16 мас. %, кремния — 0,15 мас. %, алюминия — 2,3 мас. %. При таком содержании кремния количество силицидов не должно быть чрезмерно большим: определено, что количество силицидов в сплаве образца № 1 менее 3,5 об. %, а в образце № 2 — менее 4,5 %. Алюминий в количестве 2,3 мас. % может

<sup>1</sup>РД 50-672-88. Расчёты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. Методические указания. М.: Изд-во стандартов, 1989. 21 с.

стабилизировать  $\beta$ -фазу и препятствовать выделению при охлаждении из  $\beta$ -области  $\alpha$ -твёрдого раствора.

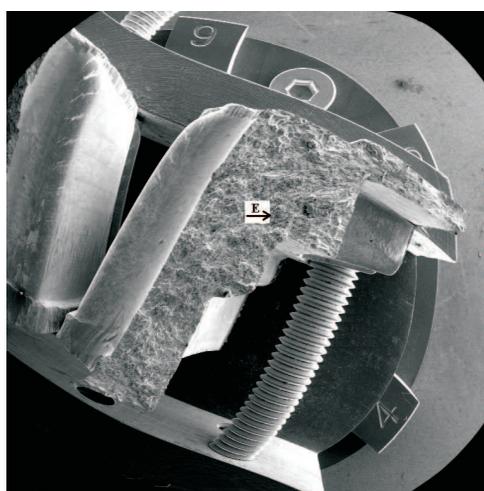
Исследования обеих поверхностей трещины в детали № 1 показали, что по рельефу они не отличаются, но на одной из них присутствуют неметаллические включения. Макрофрактография поверхностей разрушения представлена на рис. 1. Неметаллические включения, обнаруженные на поверхности разрушения образца № 1, были идентифицированы как шлаковые на основе оксида  $\text{SiO}_2$  или сажистые на основе углерода.

По макрогеометрии поверхности разрушения изломы можно считать неоднородными, характеризующимися наличием зон, отличающихся по макро-рельефу, то есть можно различить участки с шероховатой матовой поверхностью и участки со сглаженной блестящей поверхностью. При небольшом увеличении (64-крат.) на поверхности можно различить зоны волокнистого излома с матовой шероховатой поверхностью разрушения с признаками пластической деформации в виде утяжек и зоны камневидного излома с грубо-зернистым строением и трещинами по границам зёрен (рис. 2).

При рассмотрении на микроуровне (с увеличениями более 200 крат.) на участках камневидного излома (см. рис. 2 область А) на поверхности фасеток наблюдаются ямки. Это так называемый «сотовый рельеф» — микрорельеф поверхности разрушения в виде мелких плоских ямок, наблюдаемый при разрушении перегретых сплавов. Наличие такого рельефа свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации при разрушении.

В соответствии с п. 2.4 РД 50-672-88 по микрорельефу изломов было выделено три типа разрушения: участки хрупкого, квазихрупкого и вязкого изломов.

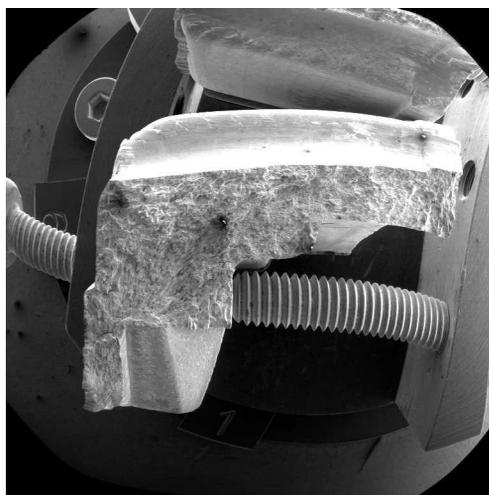
Участки хрупкого излома характеризуются наличием фасеток внутризёрненного и межзёрненного скола и ручьистым узором, который наблюдается



SEM HV: 15.00 kV SEM MAG: ---  
PC: 7 View field:  
Det: SE Detector SM: FISH EYE

Digital Microscopy Imaging

а



SEM HV: 15.00 kV SEM MAG: ---  
PC: 4 View field:  
Det: SE Detector SM: FISH EYE

Digital Microscopy Imaging

б

Рис. 1. Фрактография поверхностей растрепанной трещины на детали после горячей штамповки на ОАО «АВТОВАЗ»

только вблизи зернограничных трещин, что свидетельствует о весьма охрупченном состоянии границ зёрен исследуемого сплава.

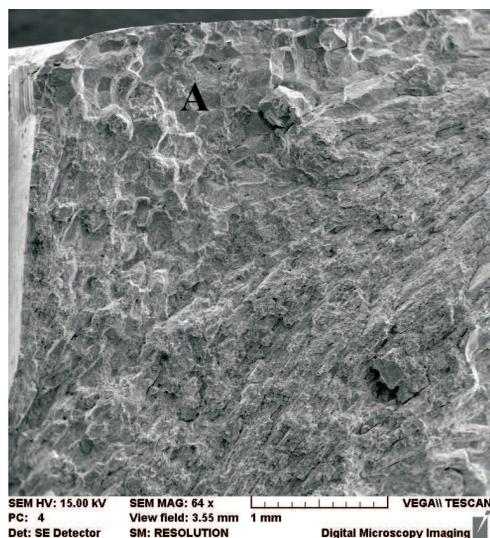


Рис. 2. Зоны камневидного (область А) и волокнистого излома на поверхности раскрытой трещины образца № 1

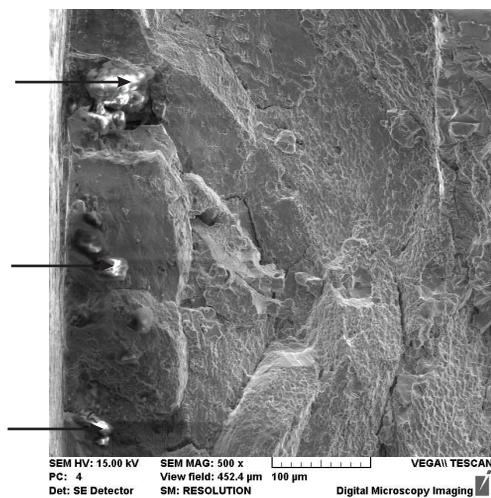


Рис. 3. Углеродосодержащие и шлаковые на основе оксида  $\text{SiO}_2$  включения (указаны стрелками), трещины по границам зёрен и сотовый рельеф на поверхностях фасеток межзёренного разрушения (образца № 1)

Вязкий излом с множественными трещинами проявляется главным образом в зоне максимальной пластической деформации детали при горячей штамповке (см. рис. 1, участок Е). Трещины на поверхности разрушения являются, скорее всего, результатом больших пластических деформаций при горячей штамповке, в результате которой образуется большое количество микропор, объединяющихся в направлении максимально действующих напряжений с образованием микротрещин. Присутствие трещин по границам зёрен по всей поверхности разрушения облегчает образование магистральной трещины и процесс разрушения.

Неметаллические включения, обнаруженные на поверхности разрушения образца № 1, нельзя считать причиной растрескивания детали, так как трещин вблизи них нет (см. рис. 3). На данном рисунке показано, что множественные сажистые включения сосредоточены в теле зерна, а трещины развиваются по границам зёрен, не только вблизи поверхности, но и по всему объёму детали.

При исследовании поверхности разрушения детали № 2 было выяснено, что в целом рельеф поверхности схож с рельефом поверхности детали № 1. Однако были обнаружены участки нафталинистого излома, характерного для перегретых деформированных сплавов и связанного с внутризёренным хрупким разрушением по определенным кристаллографическим плоскостям (см. РД 50-672-88).

При рассмотрении на микроуровне выявлены фасетки межзёренного скола и квазискола, на которых можно увидеть плоские поверхности. Силициды видны на плоских поверхностях, но трещин рядом с ними не обнаружено, что свидетельствует об ис-

ключении охрупчивающего влияния силицидов в данном сплаве [2].

Рельеф поверхности разрушения колец № 3 и № 4, отштампованных при 780 °С, отличается от рельефа поверхности раскрытых трещин колец № 1 и № 2. При 25-кратном увеличении поверхность разрушения образца № 4 можно охарактеризовать как матовую, волокнистую, шероховатую.

При микроскопических исследованиях с увеличением более 200 крат. хорошо различим участок волокнистого (вязкого) излома с множественными трещинами, который относится к зоне максимальной пластической деформации детали при горячей штамповке (см. рис. 4). На поверхности разрушения, обнаружены участки с элементами хрупкого разрушения, такие как фасетки внутривершинного скола, рубцы, складки, ступеньки, образующиеся при соединении двух микроповерхностей разрушения, расположенных на разных уровнях.

Рельеф поверхности образца № 4 отличался от образца № 3 наличием зоны камневидного излома с грубозернистым строением, которое характерно для перегретых сплавов. Зёрна имеют металлический блеск и

представляются как бы оплавленными. При рассмотрении на микроуровне выявляются фасетки межзёрненного разрушения. Зёрна имеют металлический блеск и представляются как бы оплавленными. При рассмотрении на микроуровне выявляются фасетки межзёрненного разрушения.

На поверхности разрушения образцов № 3 и № 4 обнаружены углеродосодержащие и шлаковые включения. Данные включения не повлияли на прочность детали в целом, о чем говорит тот факт, что деталь № 4 не была забракована в ходе операции «прозвона». Также были видны силициды на плоских поверхностях, рядом с которыми не было микротрещин, что свидетельствует об отсутствии охрупчивающего влияния силицидов в данном сплаве. Механизм влияния частиц силицидов на процессы разрушения легированных латуней подробно изучен в работе [2]: частицы размерами до 10 мкм не могут вызвать развития трещин, а являются очагом зарождения микропустот, которые на поверхности разрушения проявляются в виде ямок вязкого разрушения.

На поверхности разрушения образцов № 5 и № 6, отштампованных при более низкой температуре, участков камневидного излома не обнаружено. На поверхности разрушения детали № 6 обнаружено больше трещин, чем на поверхности разрушения детали № 5, что является их основным отличием. Рельеф поверхности характеризуется наличием участков волокнистого, волокнисто-полосчатого излома, характеризующегося наличием слоистости,

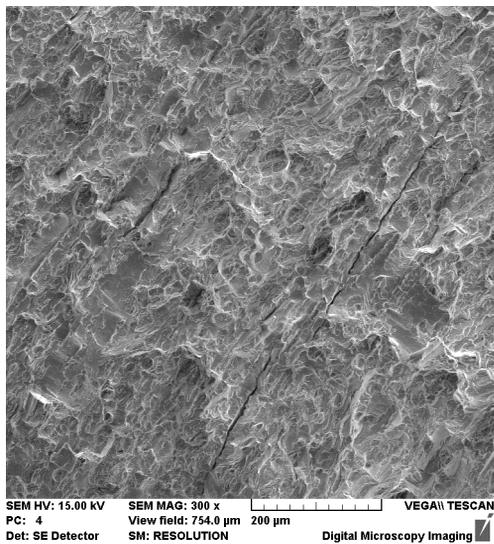


Рис. 4. Участок волокнистого (вязкого) излома с множественными трещинами (образец № 4)

которая связана со структурной неоднородностью деформированного материала (см. РД 50-672-88). На поверхности разрушения обнаружены включения, аналогичные включениям на поверхности разрушения деталей № 1–4, что подтверждает отсутствие влияния этих частиц на процесс разрушения.

Исследования структуры показали, что в сплаве деталей отштампованных по штатному (образцы № 3 и № 4) и опытному (образцы № 5 и № 6) режимам,  $\alpha$ -фаза отсутствует. Тем не менее следует отметить, что из партии в 100 колец, отштампованных по штатному и опытному режимам, в брак по трещинам отошло 21 % деталей при нагреве деталей перед штамповкой до 780 °С и 3 % деталей при нагреве деталей перед штамповкой до 700 °С. Полученные данные еще раз подтверждают тот факт, что температура нагрева заготовок перед штамповкой является завышенной.

### Выводы.

1. В настоящей работе показана наиболее высокая перспективность опытного режима штамповки (при температуре 700 °С) по сравнению со штатным режимом (при 780 °С).
2. Причиной межзёрненного растрескивания колец после горячей штамповки является полное отсутствие пластичной  $\alpha$ -фазы, способной релаксировать внутренние остаточные напряжения.
3. Наличие частиц силицидов или графитовых включений в поверхностных слоях не является причиной разрушения колец, о чем свидетельствует их присутствие во всех исследованных кольцах примерно в одинаковом количестве.
4. Для повышения стойкости исследованного сплава к перегреву следует рассмотреть такие технологические приемы как снижение содержания свинца — легкоплавкой примеси, имеющей склонность к ликвации при нагреве, добавление свежих ломов, не участвующих в процессе изготовления труб с целью исключения появления новых нежелательных факторов и ужесточение требования к шихтовым материалам для снижения суммарного содержания вредных примесей, способствующих ослаблению границ зёрен.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. М.: МИСИС, 2005. 432 с. [Kolachev B. A., Elagin V. I., Livanov V. A. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Nonferrous Metals and Alloys*. Moscow: MISIS, 2005. 432 pp.]
2. Пугачева Н. Б. *Структура и свойства деформируемых легированных латуней*. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 174 с. [Pugacheva N. B. *Structure and properties of deformed doped brasses*. Ekaterinburg: UrO RAN, 2012. 174 pp.]
3. Новожионов В. И., Залазинский А. Г., Колмогоров П. С. *Методика проектирования теплового волочения изделий из латуней как ограниченно пластичных металлов / В сб.: Особенности обработки и применения изделий из тяжёлых цветных металлов: Материалы Международной научно-практической конференции*. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. [Novozhonov V. I., Zalazinskiy A. G., Kolmogorov P. S. *The technique of designing of brass product warm deep drawing as limited plastic metals / In: Features of processing and applications of products made from heavy non-ferrous metals*. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006].
4. Гордеева Т. А., Фегина И. П. *Анализ изломов при оценке надёжности материалов*. М.: Машиностроение, 1978. 200 с. [Gordeyeva T. A., Fegina I. P. *Analysis of breaks in assessing the reliability of materials*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1978. 200 pp.]

5. Чернявский К. С. Стереология в металловедении. М.: Metallurgiya, 1977. 280 с. [Chernyavskii K. S. Stereology in Metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1977. 280 pp.]

Поступила в редакцию 30/VI/2012;  
в окончательном варианте — 15/IX/2012.

MSC: 74A50; 74-05

## THE INFLUENCE OF THE PRESSED HOLLOW BILLET OF BRASS 59CU-3,5MN-2,5AL-0,5FE-0,4NI STRUCTURE ON THE FRACTURE MODE OF DESTRUCTION WITH FOLLOWING HOT STAMPING

*N. B. Pugacheva, A. V. Lebed'*

Institute of Engineering Science, Ural Branch of RAS,  
34, Komsomolskaya st., Ekaterinburg, 620049, Russia.

E-mails: nat@imash.uran.ru, annalebed5@rambler.ru

*The influence of the hot stamping temperature on the structural state of brass 59Cu-3,5Mn-2,5Al-0,5Fe-0,4Ni and the character of blocking rings destruction of the synchronizer of the car transfer change box have been investigated. It is shown that the lack of ductile  $\alpha$ -phase in the investigated alloy in combination with high temperature of heating (780 °C) before stamping leads to intergranular brittle fracture under the action of residual stresses. Decrease in temperature stamping to 700 °C with the same structural condition of the brass excludes cracking of the brass rings under the effect of residual stresses and changes the character of destruction under bending load with rock-like to pits-like one.*

**Key words:** *brass, microstructure, alpha-phase, beta-phase, silicides, blocking ring of the synchronizer, destruction, fractography, fracture, inclusions.*

Original article submitted 30/VI/2012;  
revision submitted 15/IX/2012.

---

*Nataliya B. Pugacheva* (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Research Scientist, Laboratory of Material Micromechanics.

*Anna V. Lebed'*, Postgraduate Student, Laboratory of Material Micromechanics.