

УДК 621.7.044.2+621.762.04

Лобода П. И., Зворыкин Л. О., Новичков М. О., Солодкий Е. В.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».
Украина, г. КиевОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В СПЛАВЕ Т110
В РЕЗУЛЬТАТЕ УДАРНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Титановый сплав Т-110 исследован на устойчивость к ударным нагрузкам. Для структуры поверхности разрушения образца сплава Т110 в области ударного воздействия характерны два типа следов разрушения – вязко-пластические и хрупкие. Изменения структуры зерен α -фазы показывают вероятность прохождения фазового перехода $\alpha \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$, которое происходит в созданных условиях нагрузки. Рассчитанная ударная адиабата сплава Т-110 позволила установить амплитуду динамического давления. Показано, что сплав Т110 не может обладать устойчивостью к разрушению под действием ударной нагрузки стальным ударником выше скорости соударения ~ 480–500 м/с.

Ключевые слова: титан; сплав Т110, металлографическая структура; микротвердость; ударная адиабата.

Титановые сплавы обладают преимуществами, связанными с возможностью достижения высоких физико-механических свойств, при сравнительно невысокой плотности материала, а соответственно, повышенных массогабаритных характеристик. Это особо важно для изделий, подвергаемых в процессе эксплуатации ударным нагрузкам.

Для титана и его сплавов в условиях ударного сжатия не характерны фазовые переходы до достижения уровня ~7...10 ГПа. При динамических давлениях больших 35 ГПа наблюдается переход $\alpha \rightarrow \omega$, $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ [1–6].

Фаза ω высокого давления метастабильна, что не позволяет обнаруживать ее следы после разгрузки, особенно при высоких степенях остаточной деформации, для которых характерны повышенные температуры после нагрузки. Это дает основания анализировать наличие лишь соотношение α , β -фаз и их морфологии до и после нагрузки, как фактор косвенного свидетельства протекания фазового перехода.

Для титана (ВТ1-0), в результате ударного сжатия, в интервале импульсных давлений 1,5...10 ГПа характерно развитие интенсивного двойникования. При росте динамического давления увеличивается плотность дислокаций и количество двойников, инициируется двойникование в большем количестве кристаллографических плоскостей – от $\{10\bar{1}2\}$ при 0,5 ГПа до $\{11\bar{2}2\}$ и $\{11\bar{2}3\}$ при 10 ГПа [1–2]. В сплаве ВТ-8 в результате действия импульсной нагрузки 1,5 ГПа возрастает плотность дислокаций и в β -фазе наблюдается развитие микротрещин. В α -фазе усиливается призматическое скольжение по $\{10\bar{1}0\}\langle 12\bar{1}0 \rangle$ плоскостям и развитие двойникования по плоскостям $\{11\bar{2}1\}$ [3–4].

В сплаве ВТ-30 при 1,5 ГПа в β -фазе наблюдается двойникование в $\{112\}\langle 111 \rangle$, а при возрастании амплитуды динамического давления оно интенсифицируется. Наблюдается и возникновение α' -фазы с большим количеством двойников [4]. Возрастание количества двойников и систем двойникования в сплаве РМ138644 с ростом амплитуды ударной волны 30 ГПа отмечали и авторы [7].

В сплаве ВТ-5Л прохождение ударных волн 10...30 ГПа приводит к увеличению равномерности распределения легирующих элементов, измельчению зерна, развития в них процессов полигонизации. Зависимость структурных изменений в этом сплаве от динамического давления в работе [8] не наблюдалась.

В настоящем исследовании ударную нагрузку титанового образца осуществляли стальным цилиндрическим ударником (высокоуглеродистая сталь У12А) массой 9,6 мм, длиной 54 мм, с конической областью ударного воздействия. Скорость соударения составляла 789 м/с. Образцы сплава Т110 имели размер 1000×1000×12 мм и крепились на массивной плите Ст.3. Вектор скорости ударника был перпендикулярен плоскости образца.

Высокопрочный титановый сплав Т110, химический состав которого приведен в таблице 1, выплав-

Таблица 1

Химический состав титанового сплава Т110

| Содержание элементов, % | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| Al | Nb | V | Mo | Zr | Fe | Ti |
| 4,5 | 3,6 | 1,7 | 0,8 | 0,2 | 1,6 | остальное |

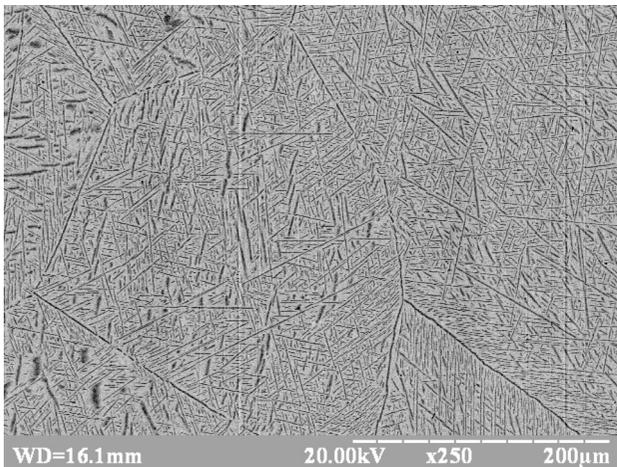


Рис. 1. Металлографическая структура сплава Т110 в исходном состоянии

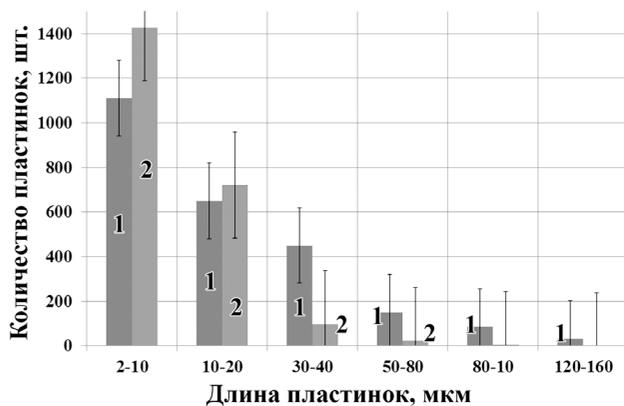


Рис. 2. Гистограмма распределения α -пластинок по длине в равноосном β -зерне сплава Т110
1 – до ударной нагрузки, 2 – после ударной нагрузки

лялся в электронно-лучевой установке УЭ-5812 с промежуточной емкостью по технологии двойного перегрева [9]. Содержание химических элементов в

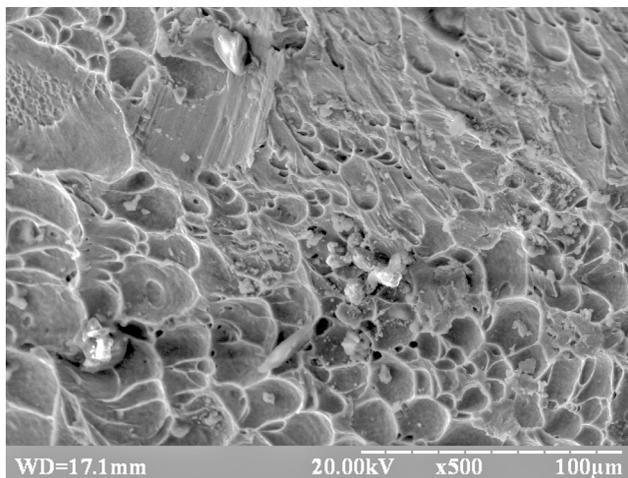
сплаве Т110 контролировалось микрорентгено-спектральным анализом.

Микроструктура сплава Т110 в исходном состоянии представляла собой удлиненные α -пластинки внутри равноосных β -зерен. Величина β -зерен составляла близко 300 мкм, а толщина α -пластинок составляла 0,5...2 мкм. Такая микроструктура характерна для двухфазных сплавов с пластинчатой структурой. Ориентация α -пластинок совпадает с направлениями осей симметрии. Максимальная длина достигает 160 мкм, причем большая часть пластинок имеет длину от 5 до 20 мкм.

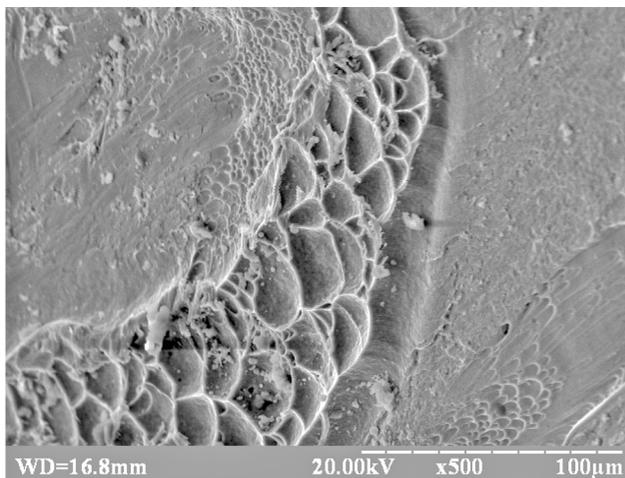
В результате инициированного в эксперименте соударения ударника с пластиной Т110 наблюдалось фрагментационное разрушение исследуемого образца. Был проведен анализ характера возникающих разрушений и структурных изменений в зоне механического воздействия ударника.

На рис. 3 приведена структура поверхности разрушения образца сплава Т110 в области ударного воздействия. Анализ показывает, что для поверхности характерны два типа следов разрушения - вязко-пластические (следы кратковременных пластических течений рис. 3а) и хрупкие (зоны хрупкого скола рис. 3б). Соотношение площадей поверхностей хрупких и пластических следов разрушений изменяется при удалении от зоны соударения в радиальном направлении от 35:65 внутри области диаметром 1,4 диаметра ударника до 60:40 вне такой области.

Характер наблюдаемых разрушений дает основания считать, что основным фактором, определяющим процесс разрушения образца, было проникновение стального ударника в пластину с образованием ударной выемки и возникновение растягивающих напряжений, в результате взаимодействия упруго-пластической волны сжатия и упругих отраженных волн разгрузки. Об этом, в частности свидетельству-



а



б

Рис. 3. Структура поверхности разрушения образца сплава Т110 в области ударного воздействия

ет хрупкий характер наблюдаемых разрушений пластины. Сплав Т110, обладающий высоким уровнем ударной вязкости $K_c = 48 \text{ Дж/см}^2$ и относящийся к категории сплавов с поливариантными механизмами реализации процессов пластической деформации в значительной части (35...60%) разрушается преимущественно хрупко, с образованием большого количества скольных трещин, инициированных развитием кратковременных пластических течений, что обусловлено высокой скоростью нарастания растягивающих и касательных напряжений.

Для анализа ударно волнового взаимодействия целесообразно оценить соответствующие динамические нагрузки. Для оценки процессов происходящих в сплаве Т110 при ударной нагрузке необходимо использовать его ударную адиабату. Экспериментально определять эту характеристику довольно трудоемко и сложно, в связи с чем в работе проведен ее расчет по методике, предложенной в [10].

Учитывается, что при торможении ударника, разогнанного до скорости V_y , в материале преграды, в последнем возникает ударная волна, выход которой на границу с другим материалом сопровождается образованием либо двух ударных волн, распространяющихся в обе стороны от контактной поверхности (более жесткая подкладка), либо ударной волны и отраженной волны разгрузки (менее жесткая подкладка).

Давление в ударной волне можно записать в виде:

$$P_1 = P_0 + \rho_0 D_{01} u_{01}$$

где P_1 — амплитуда волны сжатия; P_0 — начальное давление; ρ_0 — начальная плотность преграды; D_{01} — скорость ударной волны в преграде; u_{01} — массовая скорость в ударной волне.

Формально ударной адиабатой является соотношение приращения удельной внутренней энергии в процессе ударного сжатия с приращением давления и плотности, но в связи в однозначной взаимосвязью этих характеристик с зависимостями $P = P(\rho)$, $D = D(u)$, $P = P(u)$, каждая из этих зависимостей характеризует ударную адиабату и могут быть взаимно пересчитаны.

Обычно данные по ударным адиабатам представляются двумя парами параметров: кинематическими D и u , непосредственно измеряемыми в эксперименте, и термодинамическими P и ρ , рассчитанными по законам сохранения [11]. Большинство экспериментальных данных, представленных в $D = D(u)$ зависимостях, для сплошных металлов, сплавов и ряда других веществ аппроксимированы функциональной зависимостью в виде:

$$D = a_0 + a_1 u + \frac{a_2}{1 + a_3 u}$$

Соответствующие коэффициенты a_i — рассчитываются по экспериментальным данным Лос-Аламосской лаборатории (США), ВНИИЭФ (РФ) и других ведущих научных центров [12,13,14].

Таблица 2

Характеристики металлов для расчета ударной адиабаты сплава Т110

| Материал | a_0 | a_1 | a_2 | $P_0, \text{г/см}^3$ |
|----------|-------|-------|-------|----------------------|
| Al | 5,4 | 1,329 | 0 | 2,71 |
| Ti | 4,722 | 1,128 | 0 | 4,5 |
| Fe | 4,63 | 1,33 | 0 | 7,85 |
| Nb | 4,384 | 1,258 | 0 | 8,58 |
| V | 5,05 | 1,227 | 0 | 6,08 |
| Mo | 5,08 | 1,275 | 0 | 10,206 |
| Zr | 3,83 | 0,914 | 0 | 6,51 |

Для расчета в работе использованы следующие характеристики ударных адиабат:

Результаты расчета ударной адиабаты сплава Т110 представлены на рис. 4.

При соударении в преграде и ударнике возбуждается ударные волны, распространяющиеся от поверхности контакта. Параметры ударной волны в преграде определяются из условий равенства давлений и массовых скоростей в момент соударения по обе стороны от поверхности соударения и их соответствия ударным адиабатам преграды и ударника. Значения параметров соответствуют точке пересечения в координатах $P-u$ ударной адиабаты материала преграды и ударной адиабаты торможения материала ударника, имеющего начальную скорость V_y рис. 5.

Полученные результаты дают возможность определить амплитуду динамического давления при соударении стального ударника с преградой из Т110 $P_{ув} = 11,7 \text{ ГПа}$.

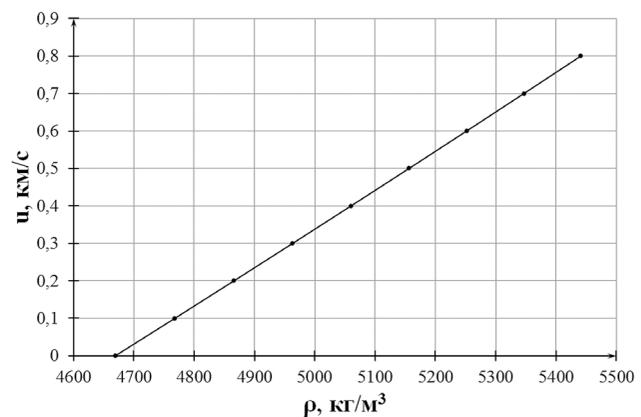


Рис. 4. Ударная адиабата u - ρ сжатия сплава Т110

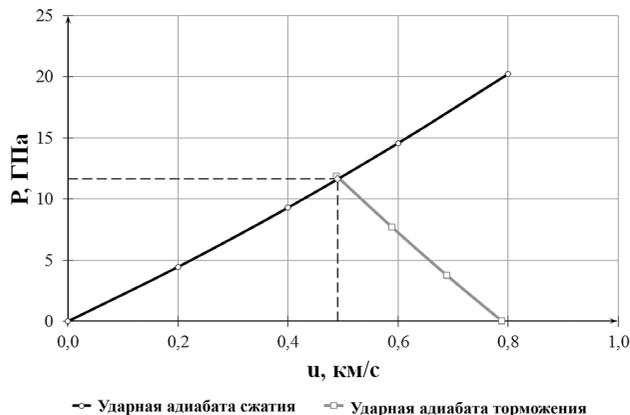


Рис. 5. Ударные адиабаты P -и сжатия сплава Т110 и торможения стального ударника

Расчет динамического давления соответствующего критическому уровню сжатия позволяет определить максимально допустимую скорость ударника. Если предположить, что возникновение фазовых переходов мартенситного типа в α -титане является фактором его потери прочности, то динамическое давление для сохранения механической прочности не должно превышать порога около 7 ГПа, что приблизительно соответствует скорости ударника 480–500 м/с (рис. 4).

Таким образом, проведенные исследования структурных особенностей сплава Т110, показали, что этот сплав при воздействии ударника со скоростью 789 м/с не выдерживает механической нагрузки и разрушается. Анализ условий нагрузки с использованием рассчитанной ударной адиабаты сплава Т110 и известной адиабатой стального ударника позволили установить, что амплитуда динамического давления превышала уровень начала обратимого процесса образования фаз высокого давления.

Полученные результаты показывают, что микротвердость сплава Т110 после ударной нагрузки возрастает с 481 HRV до 517 HRV микроструктура после деформации имеет вид аналогичный структуре в исходном состоянии (удлиненные α -пластины внутри равноосных β -зерен). Величина β -зерен составляет около 200...250 мкм, а толщина α -пластин составляет 0,5...1 мкм. По сравнению с исходным состоянием длина и толщина α -пластин в образце после нагрузки значительно уменьшилась. Большое количество пластин имеет размер 2...6 мкм, а подавляющее большинство пластин имеет длину 10...15 мкм. Максимальная длина достигает 50 мкм.

Все это свидетельствует о протекании фазового перехода $\alpha \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$, которое происходит в созданных условиях нагрузки и оказывает влияние на конечную морфологию α -фазы. Наблюдаемые процессы перекристаллизации дают основания предполагать, что сплав Т110, вероятно, не может

обладать устойчивостью к разрушению под действием ударной нагрузки стальным ударником выше скорости соударения $V_y \sim 480\text{--}500$ м/с. В этом диапазоне динамическом давлений инициируется $\alpha \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$ превращение снижающее, при его протекании, прочностные свойства титанового сплава. В случае более высоких скоростей ударника, для предохранения преграды из сплава Т110 от разрушения, целесообразно использовать демпфирующий слой прочного более сжимаемого материала.

Литература

- [1] Герман В.Н., Баканова А.А., Тарасова Л.А. и др. / Фазовые превращения титана и циркония в ударных волнах. — Физика твердого тела. — 1970, т.12, с.637-639
- [2] Кутсар А.Р., Герман В.Н., Носова Г.И. / Фазовые превращения в титане и цирконии в ударных волнах. — В кн.: Структура фаз, фазовые превращения и диаграмме металлических систем. — М.-Наука, 1974. — с.72-76
- [3] Красовский А.Я., Петров Ю.Н., Надеждин Г.Н., Свечников В.Л. и др./ Особенности пластической деформации сплавов титана при импульсной нагрузке. — Проблемы прочности. — 1983, №1, с.72-76
- [4] Красовский А.Я., Петров Ю.Н., Надеждин Г.Н., Свечников В.Л. и др. Механизмы пластической деформации и разрушения титановых сплавов в связи с образованием в них гидридной фазы. — Препринт ИПП АН УССР.- 1983.- Киев, 54 с.
- [5] Koul M.H., Breedis J.F. / The Science and Technology and Application of Titanium. Oxford. — Pergamon Press, 1969, 795 p.
- [6] Sikks S.K., Yohra Y.K., Chidambaram R. //Progr. Mater. Sci. — 1982. — V.27, №3-4, p.245-310
- [7] Rach H.J. //Metallurg.Trans. — 1976. —V.7A.- №10. — p.1571-1576
- [8] Арисова В.Н., Курасова Н.Н., Рядинская И.М. Изучение структуры титанового сплава ВТ 5Л, подвергнутого ударной обработке. В кн.: Металловедение и прочность материалов — ВПИ. Волгоград, 1986, с.132-136
- [9] Патон Б.Е. Электронно-лучевая плавка титана / Б.Е.Патон, Н.П.Тригуб, С.В.Ахонин та др. — К.: Наук. думка, 2006. — 248с.: ил.
- [10] Белякова М.Ю., Жерноклетов М.В., Сутулов Ю.Н., Трунин Р.Ф. Ударное сжатие металлических сплавов. В кн.: Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах — ВНИИЭФ, Арзамас-16, 1992, с.187-197
- [11] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.- М.- Госиздат. Физ. Мат. Литературы, 1963, 632 с.

- [12] LAS L Shook Hugoniot data (Los Alamos Series on Dynamic Material Properties). Editor S.P.Marsh, University of California, Press. Berkeley. Los Angeles – London, 1980, 687 p.
- [13] Van Thiel M. Compendium of shock- wave date. UCRL-59108, 1977
- [14] Trunin R. F. Shock Compression of Condensed Materials- All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov.- Cambridge University Press. – 2005, p. 167

Loboda P. I., Zvorykin L. O., Kosyuk V. S., Soldkiy E. V.

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

PECULIARTIES MODIFICATIONS OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE ALLOY T110 AS A RESULT OF SHOCK MECHANICAL LOADS

Titanium alloy T-110 were investigated for resistance to shock loads. For the structure of fractured surfaces of the sample of alloy T110 in the area of impact is characterized by two type of traces of fracture – visco-plastic and fragile. Transformation of the structure of grains of the α -phase shows the probability of the phase transition $\alpha \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$, which occurs in the load conditions. Calculated percussive hugoniots alloy T-110 has allowed to establish the dynamic pressure amplitude. The alloy T110 cannot be resistant to destruction under the action of the shock load steel projectile above the speed of impact ~ 480–500 m/s.

Keywords: Titanium; alloy T-110; Hugoniots; metallographic structure; surface of destruction.

References

- [1] German V. N., Bakanova A. A., Tarasova L. A. and etc. / Fazovye prevrashheniya titana i cirkonija v udarnyh volnah. – Fizikatverdogotela. - 1970, t.12, P.637-639
- [2] Kutsar A. R., German V. N., Nosova G. I. / Fazovye prevrashheniya v titane i cirkonii v udarnyh volnah. – V kn.: Struktura faz, fazovye prevrashheniya i diagramme metallicheskih sistem. – M.-Nauki, 1974. – P.72-76
- [3] Krasovskij A. Ja., Petrov Ju. N., Nadezhdin G. N., Svechnikov V. L. and etc. / Osobennosti plasticheskoj deformacii splavov titana pri impul'snoj nagruzke. – Problemy prochnosti. - 1983, №1, P.72-76
- [4] Krasovskij A. Ja., Petrov Ju. N., Nadezhdin G. N., Svechnikov V. L. and etc. / Mehanizmy plasticheskoj deformacii i razrushenija titanovyh splavov v svjazi s obrazovaniem v nih gidridnoj fazy. – Preprint IPP AN USSR. - 1983. - Kiev, p. 54
- [5] Koul M.H., Breedis J. F. / The Science and Technology and Application of Titanium. Oxford. – Pergamon Press, 1969, P.795
- [6] Sikks S. K., Yohra Y. K., Chidambaram R. / Progr. Mater. Sci. – 1982. – V.27, №3-4, P.245-310
- [7] Rach H. J. / Metallurg.Trans. – 1976. –V.7A.- №10. – P.1571-1576
- [8] Arisova V. N., Kurasova N. N., Rjadinskaja I. M. / Izuchenie struktury titanovogo splava VT 5L, podvergnutogo udarnoj obrabotke. V kn.: Metallovedenie i prochnost' materialov – VPI. Volgograd, 1986, p. 132-136
- [9] Paton B.E. Elektronno-luchevaja plavka titana / B. E. Paton, N. P. Trigub, S. V. Ahonin and etc. – K.: Nauk. dumka, 2006. – P.248: il.
- [10] Beljakova M. Ju., Zhernokletov M. V., Sutulov Ju. N., Trunin R. F. / Udarnoe szhatie metallicheskih splavov. V kn.: Svoystva kondensirovannyh veshhestv pri vysokih davlenijah i temperaturah – VNIIF, Arzamas-16, 1992, P.187-197
- [11] Zel'dovich Ja. B., Rajzer Ju. P. / Fizika udarnyh voln i vysokotemperaturnyh gidrodinamicheski hjavlenij. - M.-Gosizdat. Fiz. Mat. Literatuy, 1963, P.632
- [12] LAS L Shock Hugoniot data (Los Alamos Series on Dynamic Material Properties). Editor S.P. Marsh, University of California, Press. Berkeley. Los Angeles – London, 1980, 687 p.
- [13] Van Thiel M. Compendium of shock- wave date. UCRL-59108, 1977
- [14] Trunin R. F. Shock Compression of Condensed Materials-All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov.- Cambridge University Press. – 2005, p. 167