

ISSN 0002-3566 (print)

УДК 621.778.534-8

Поступила в редакцию 04.11.2016

Received 04.11.2016

**В. В. Клубович<sup>1</sup>, М. М. Кулак<sup>2</sup>, Е. В. Хрущёв<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*<sup>2</sup>*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Беларусь***РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБОПРОТЕЗНЫХ ДИСКОВ ИЗ СПЛАВОВ ЗОЛОТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ**

При работе с драгоценными металлами необходим поиск таких способов обработки, при которых безвозвратные потери драгоценного металла будут минимальными. В связи с этим необходимо исследовать основные физико-механические свойства драгоценных металлов: прочность, твердость, упругость, пластичность и их коррозионную стойкость; определить влияние температуры обработки на механические характеристики полученных слитков драгметалла. Кроме того, необходимо знать физико-химические свойства металлов, входящих в состав сплава, возможности воздействия на них методами обработки металлов давлением, причем знание таких свойств особенно важно при изготовлении зубопротезных дисков.

В результате исследований установлено, что при прокатке полосы сплава золота 900-й пробы исходной толщины от 4 до 0,55 мм происходит вытягивание зерен в направлении прокатки, предел прочности сплава ЗлСрМ 900-40 увеличивается почти в 2 раза и отжиг при температуре 650 °С в течение 3 мин полностью восстанавливает пластические свойства сплава.

*Ключевые слова:* сплав золота, зубопротезные диски, прокатка, наклеп, уширение, очаг деформации, пластическая деформация, дробная деформация, отжиг.

**V.V. Klubovich<sup>1</sup>, M.M. Kulak<sup>2</sup>, E.V. Khrushchov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*<sup>2</sup>*The Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Belarus***DEVELOPMENT OF MANUFACTURING TECHNIQUES OF DENTOPROSTHETIC DISKS FROM GOLD ALLOYS AND THE RESEARCH OF THEIR PROPERTIES**

Searching of such ways of processing at which irrevocable losses of precious metal will be minimum is necessary during the work with precious metals. In this regard it is necessary to investigate the main physico-mechanical properties of precious metals: durability, hardness, elasticity, plasticity and their rust resistance; to define temperature effect of processing on mechanical characteristics of the obtained precious metal ingots. Besides it is necessary to know physical and chemical properties of the metals which are a part of alloy, their workability by methods of metal forming, and knowledge of such properties is especially important at manufacture of dentoprosthetic disks.

As a result of researches it is established that when rolling a strip of gold alloy of 900 fineness from initial thickness 4 mm to 0.55 mm, there is an extraction of grains in the direction of rolling; ultimate strength of alloy of AuAgCu 900-40 increases almost twice. Further annealing at temperature of 650 °C for 3 minutes completely restores plastic properties of the alloy.

*Keywords:* gold alloy, dentoprosthetic discs, rolling, peening, broadening, deformation center, plastic strain, fractional deformation, annealing.

**Введение.** При работе с драгоценными металлами необходим поиск таких способов обработки, при которых безвозвратные потери драгоценного металла будут минимальными [1].

В связи с этим необходимо исследовать основные физико-механические свойства драгоценных металлов: прочность, твердость, упругость, пластичность и их коррозионную стойкость; определить влияние температуры обработки на механические характеристики полученных слитков драгметалла [2]. Кроме того, необходимо знать физико-химические свойства металлов, входящих в состав сплава, возможности воздействия на них методами обработки металлов давлением, причем знание таких свойств особенно важно при изготовлении зубопротезных дисков.

**Материалы и методы исследования.** Согласно постановлению Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 72 от 14.08.2007 г. «Инструкция о порядке приема, учета, хранения, использования драгоценных металлов для зубопротезирования» для зубных протезов, коронок, мостовидных протезов используется сплав золота 900-й пробы (90 % золота, 4 % серебра и 6 % меди (ЗлСрМ 900-40)).

Полный технологический цикл изготовления стоматологических дисков из сплава золота 900-й пробы состоит из трех основных стадий: первая – получение литьем заготовок для механической обработки, вторая – прокатка заготовок в полосу и третья – изготовление дисков путем вырубки на штампах.

На первой стадии после проведения централизованной и окислительной плавок, когда получают сплав 900-й пробы, из него отливают слитки необходимой ширины толщиной 4 мм. Перед разливкой сплава золота изложницы нагревают до температуры 60–100 °С и смазывают пчелиным воском.

Затем слитки охлаждают в проточной холодной воде, очищают от посторонних примесей и грязи. После взвешивания слитки передают для механической обработки путем продольной прокатки до толщины полосы 0,3 мм.

Прокатку слитков золота осуществляют на двухвалковом лабораторном прокатном стане. В результате действия приложенных сил со стороны валков металл течет не только в продольном, но и в поперечном направлении, вследствие этого ширина полосы при выходе из валков всегда несколько больше исходной ширины.

Уширение в большинстве случаев представляет собой отрицательное явление. Оно снижает общую вытяжку при прокатке и вызывает в боковых кромках прокатываемой полосы значительные растягивающие напряжения [3].

На величину уширения при прокатке оказывает влияние много факторов: обжатие, диаметр валков, ширина и толщина полосы, контактное трение, температура, скорость прокатки, натяжение и др. Причем уширение увеличивается с ростом обжатия, диаметра валков, коэффициента трения и скорости прокатки и снижается при применении натяжения и с уменьшением толщины полосы. Обжатие при прокатке является одним из основных параметров, влияющих на величину абсолютного и относительного уширения. С увеличением обжатия увеличивается уширение.

Нами была изучена зависимость уширения  $\Delta b$  от ширины полосы  $b$  из золотого сплава ЗлСрМ 900-40 (рис. 1).

Как видно на рис. 1, зависимость уширения от ширины полосы золотого сплава ЗлСрМ 900-40 имеет сложный характер, достигая максимума при сравнительно небольшой ширине. Это объясняется тем, что при прокатке узких полос из золотого сплава ЗлСрМ 900-40 уменьшается поперечное напряжение, в связи с чем растет уширение. С увеличением ширины полосы действие подпирющих сил трения в поперечном направлении увеличивается; ввиду этого растет величина поперечного напряжения, что влечет за собой уменьшение уширения. По мере роста ширины полосы уширение возрастает, но до определенного предела, после чего увеличение ширины полосы вызывает уменьшение величины уширения.

Кроме этого, в работе было изучено изменение уширения в зависимости от дробности деформации. Для исследований были взяты полосы золотого сплава ЗлСрМ 900-40 шириной 20 мм, толщина полосы составляла 4 мм. Величина степени деформации за переход составляла в среднем 2–3 % (рис. 2).

Анализ рис. 2 показывает, что дробная деформация при прокатке способствует значительному уменьшению поперечной деформации и увеличивает продольную деформацию металла. Это можно объяснить следующими причинами. При сравнении очага деформации при прокатке за один проход и дробном режиме деформирования видно, что протяженность очага деформации в плоскости дуги захвата при прокатке за один проход значительно больше.

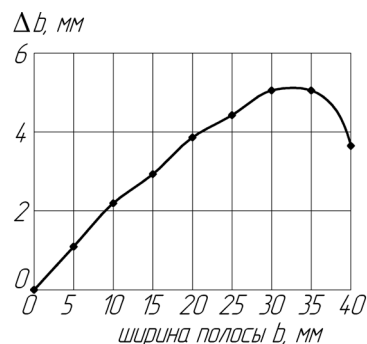


Рис. 1. Влияние исходной ширины полосы из сплава ЗлСрМ 900-40 на уширение

Fig. 1. Influence of initial width of alloy band of AuAgCu 900-40 on broadening

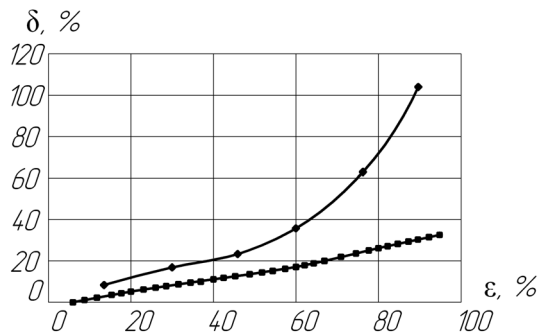


Рис. 2. Изменение относительного уширения при прокатке полосы из сплава  $ZrCrM$  900-40 в зависимости от степени деформации: ◆ – прокатка за один проход; ■ – дробная прокатка (степень деформации за один проход составляла 2–3 %)

Fig. 2. Change of the relative broadening when rolling a strip from alloy of  $AuAgCu$  900-40 depending on the degree of deformation: ◆ – 1 one pass rolling; ■ – fractional rolling (deformation at one pass was 2–3 %)

При прокатке с малыми единичными обжатиями за проход происходит значительное уменьшение очага деформации в плоскости дуги захвата при сохранении неизменным протяженности очага деформации в плоскости длины бочки валков. Согласно закону наименьшего сопротивления в случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления. Поэтому изменение очага деформации при дробной прокатке в связи с уменьшением его протяженности в плоскости дуги захвата способствует более интенсивному течению металла в продольном направлении. Соотношение между продольной и поперечной деформацией при прокатке с различными режимами должно рассматриваться с точки зрения влияния «жестких концов» на особенности течения металла в очаге деформации.

При прокатке за один проход протяженность очага деформации в плоскости дуги захвата значительно больше, а значит, и расстояние между входящим и выходящим «жесткими концами» больше. Увеличение расстояния между «жесткими концами» в связи с увеличением протяженности длины области деформации при сохранении ее ширины облегчает течение металла в поперечном направлении. Кроме того, величина уширения зависит от величины контактного трения. С увеличением трения происходит увеличение поперечной деформации в очаге деформирования.

Так как величина трения при прокатке находится в непосредственной связи с удельными давлениями в области очага деформации, то увеличение степени деформации в отдельном проходе приведет к увеличению удельных давлений, а вместе с ними и величины трения, вследствие чего возрастет поперечная деформация металла.

Наклепанный металл уширяется значительно меньше по сравнению с металлом в отожженном состоянии. Так как при каждом последующем пропуске при дробной прокатке деформируется металл, получивший уже некоторую степень упрочнения в предыдущих пропусках, то очевидно, что при дробной прокатке будет наблюдаться меньшая величина уширения.

Наряду с этим наличие определенной текстуры при прокатке по дробному режиму деформирования способствует в каждом последующем пропуске перемещению металла в продольном направлении и затрудняет перемещение металла в поперечном направлении. При этом в связи со значительно меньшей величиной уширения при дробной прокатке текстура у полос, прокатанных по дробному режиму деформирования, будет более выражена по сравнению с полосами, деформированными за один проход, при одинаковых суммарных степенях деформации.

Рассмотрим особенности течения металла в продольном и поперечном направлениях при прокатке за один проход и дробном режиме деформирования. Для дробного режима прокатки по мере увеличения суммарной степени деформации уширение увеличивается незначительно по зависимости, близкой к линейной. Относительное уширение при дробной прокатке для суммарной степени деформации около 95 % достигает величины порядка 35 %. Увеличение относительного уширения при прокатке за один проход происходит по зависимости, близкой к параболической. Относительное уширение при прокатке за один проход при средних степенях деформации относительно невелико и при степени деформации около 50 % составляет 25 %. Значительное увеличение относительного уширения при прокатке за один проход наблюдается в области степеней деформации 50–95 %. Так, относительное уширение при прокатке в малое количество пропусков до суммарных степеней деформации около 95 % составляет 115 % (см. рис. 2). Это объясняется следующими причинами. При прокатке со степенями деформации, превосходящими 50 %, металл значительно упрочняется, вследствие чего возрастают удельные давления, а зна-

чит, и величина контактного трения, что ведет к увеличению уширения. Одновременно происходит увеличение протяженности очага деформации в плоскости дуги захвата, что также в связи с увеличением расстояния между входящим и выходящим «жесткими концами» приводит к увеличению уширения.

Кроме того, при прокатке с большими обжатиями за проход увеличивается роль выходящего «жесткого конца». При начальной стадии прокатки по мере входа металла в зев валков процесс происходит при наличии только одного входящего «жесткого конца», ограничивающего течение металла в поперечном направлении, поэтому с увеличением обжатия в связи с ростом длины очага деформации влияние входящего «жесткого конца» на поперечную деформацию металла уменьшается, а уширение возрастает. В результате этого при переходе к установившемуся процессу прокатки металл в очаге деформирования будет находиться как под действием входящего узкого «жесткого конца», так и под действием выходящего широкого «жесткого конца». Возрастание обжатия при прокатке способствует увеличению уширения в начальной стадии прокатки и формированию более широкого выходящего «жесткого конца», что, несомненно, приведет к увеличению уширения при установившемся процессе прокатки.

Рассмотрим отношения поперечной деформации к продольной  $(B_k/B_0)/(L_k/L_0)$  в зависимости от степени деформации при прокатке полосы из сплава ЗлСрМ 900-40 за один проход и по дробному режиму деформирования (рис. 3).

Как видно на рис. 3, при прокатке за один проход полосы из сплава ЗлСрМ 900-40 по мере увеличения общей степени деформации отношение продольной деформации к поперечной уменьшается менее интенсивно по сравнению с прокаткой по дробному режиму деформирования.

**Результаты и их обсуждение.** Проведенные эксперименты показывают, что прокатка по дробному режиму деформирования способствует более интенсивному течению металла в продольном направлении и ограничивает перемещение металла в поперечном направлении по сравнению с прокаткой за один проход, при которой несколько уменьшается продольная деформация за счет увеличения поперечной деформации металла. В случае прокатки по дробному режиму деформирования с малыми единичными обжатиями за проход более интенсивно деформируются поверхностные слои полосы, в результате чего боковая поверхность полосы получается вогнутой. При прокатке за один проход более интенсивно деформируются центральные слои полосы, в результате чего боковая поверхность полосы получается выпуклой. Дробная прокатка способствует более интенсивному течению металла в направлении прокатки, при прокатке за один проход наблюдается большая поперечная деформация металла.

Таким образом, в результате проведенных исследований по прокатке полосы из золотого сплава 900-й пробы установлено, что уширение зависит от дробности деформации. Так, при суммарной общей степени деформации 90 % величина относительного уширения полосы составляет 105 % при прокатке за один проход и 30 % при прокатке по дробному режиму со степенью деформации за один проход 2–3 %.

Показано, что прокатка по дробному режиму деформирования интенсифицирует течение металла в продольном направлении, что позволяет уменьшить потери золотого сплава по сравнению с прокаткой за один проход за счет уменьшения ширины полосы.

Кроме изучения процесса прокатки золотых сплавов авторами были проведены исследования микроструктуры полос сплава ЗлСрМ 900-40 после их деформации, а также физико-механические свойства полос и дисков золотых сплавов 900-й пробы.

В процессе прокатки, при пластическом деформировании происходит изменение формы зерен и увеличивается прочность (наклеп).

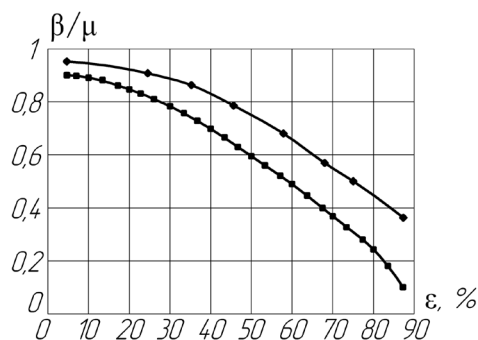


Рис. 3. Изменение отношения коэффициентов продольной  $\mu$  и поперечной  $\beta$  деформации при прокатке полосы из сплава ЗлСрМ 900-40:  $\blacklozenge$  – прокатка за один проход;  $\blacksquare$  – дробная прокатка

Fig. 3. Change of the relation of coefficients of longitudinal  $\mu$ , and lateral  $\beta$  deformation when rolling a strip from alloy of AuAgCu 900-40:  $\blacklozenge$  – one pass rolling;  $\blacksquare$  – fractional rolling

Исследования сплава ЗлСрМ 900-40, проведенные нами, показали, что кристаллическая структура пластически деформированного металла характеризуется не только искажением кристаллической решетки, но и определенной ориентировкой зерен, текстурой, а беспорядочно ориентированные кристаллы после кристаллизации под действием деформации поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации.

С увеличением деформации степень текстурованности возрастает и при больших степенях деформации достигает 100 %, то есть все зерна оказываются одинаково ориентированными. Такой характер пластического течения приводит к изменению внутризеренной структуры – дробятся блоки мозаики с одновременным увеличением степени их разориентировки. Возрастает величина внутренних напряжений, ограниченных (локализованных) малыми объемами. Пластическая деформация приводит металл также в структурно-неустойчивое состояние. Самопроизвольно происходят явления, возвращающие металл в более устойчивое структурное состояние.

К самопроизвольным процессам, которые приводят пластически деформированный металл к более устойчивому состоянию, относятся: снятие искажений кристаллической решетки, рост зерен и другие внутризеренные процессы. Искажения кристаллической решетки снимаются при сравнительно невысокой температуре, так как при этом происходит незначительное перемещение атомов.

На рис. 4 приведена микроструктура полосы сплава ЗлСрМ 900-40 после прокатки полосы исходной толщины 4 мм до толщины 0,55 мм (общая степень деформации составляет 86,3 %).

Анализ рис. 4 показывает, что при прокатке с увеличением степени деформации происходит вытягивание зерен в направлении прокатки и внутризеренная структура изменяется, блоки мозаики дробятся, внутренние напряжения возрастают, а следовательно, прочностные и пластические свойства сплава также изменяются.

Были проведены измерения изменений механических свойств золотого сплава ЗлСрМ 900-40 под действием деформации (рис. 5, 6).

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что по мере увеличения степени деформации при растяжении полос предел прочности  $\sigma_v$  растет, а относительное удлинение  $\delta$  падает.

Для снятия наклепа и увеличения пластических свойств сплава применяли отжиг.

Нами установлено, что уже небольшой нагрев (300–400 °С) снимает искажения решетки – результат многочисленных субмикроспроцессов – уменьшение плотности дислокаций в результате их взаимного уничтожения, так называемая аннигиляция, слияния блоков, уменьшение внутренних напряжений, уменьшение количества вакансий и т. д. Линии на рентгенограммах деформированного металла, размытые вследствие искажений решетки и нарушений ее правильности, вновь становятся четкими. В результате твердость и прочность несколько понижаются (на 20–30 % по сравнению с исходными), а пластичность возрастает (на 2,5 %).

Низкая температура нагрева и происходящий при ней возврат несколько повышают пластичность, а при достижении температуры 650 °С и выше происходит полная рекристаллизация



Рис. 4. Микроструктура сплава ЗлСрМ 900-40 после прокатки полосы исходной толщины 4 мм до толщины 0,55 мм (степень деформации составляет 86,3 %)

Fig. 4. The microstructure of a strip of alloy of AuAgCu 900-40 after rolling from initial thickness of 4 mm to thickness of 0.55 mm (deformation is 86.3 %)

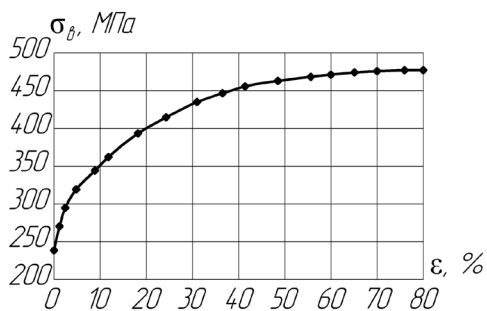


Рис. 5. Изменение предела прочности сплава ЗлСрМ 900-40 в зависимости от степени деформации при растяжении полосы толщиной 0,55 мм после дробного деформирования

Fig. 5. Change of ultimate strength of alloy of AuAgCu 900-40 depending on the degree of deformation at stretching of a strip of 0.55 mm thickness after fractional deformation

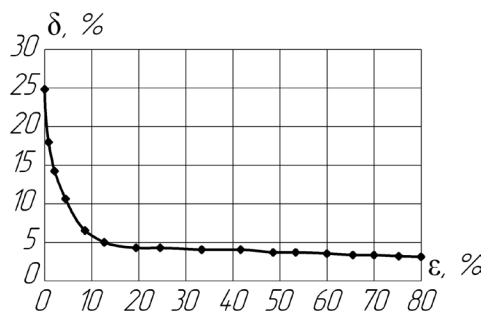


Рис. 6. Изменение относительного удлинения сплава ЗлСрМ 900-40 в зависимости от степени деформации при растяжении полосы толщиной 0,55 мм, полученной дробным деформированием

Fig. 6. Change of the specific elongation of alloy of AuAgCu 900-40 depending on the degree of deformation at stretching of a strip of 0.55 mm thickness after fractional deformation

и восстанавливается исходная (до наклепа) пластичность металла. После того как рекристаллизация (первая стадия) завершена, строение металла и его свойства становятся прежними, то есть которые он имел до деформации.

Температура рекристаллизации имеет важное практическое значение. Чтобы восстановить структуру и свойства наклепанного металла (например, при необходимости продолжить обработку давлением путем прокатки, протяжки, волочения и т. п.), его надо нагреть выше температуры рекристаллизации.

Таким образом, для получения в конечном изделии (диске) необходимых механических характеристик (твердость, пластичность) следует применять отжиг при температуре 650 °С в течение 3 мин для полосы толщиной 0,4 мм. После отжига проводить прокатку до конечной толщины 0,3 мм, затем на штампах производить вырубку дисков необходимого размера.

## Выводы

1. При прокатке полосы сплава золота 900-й пробы исходной толщины с 4 до 0,55 мм происходит вытягивание зерен в направлении прокатки, то есть возникает четко выраженная текстура.
2. Предел прочности сплава ЗлСрМ 900-40 при прокатке увеличивается от 24 до 45 кГ/мм<sup>2</sup>, а относительное удлинение уменьшается с 25 до 3 %.
3. Отжиг при температуре 650 °С в течение 3 мин полностью восстанавливает пластические свойства сплава ЗлСрМ 900-40. Температура рекристаллизации сплава ЗлСрМ 900-40 составляет 530 °С (показано при определении пластических свойств путем растяжения готовых пластин сплава).
4. Дальнейшая обработка давлением (прокатка и вырубка) позволяют получить диски с необходимыми механическими характеристиками (твердость, прочность, пластичность, изотропность свойств и равномерное распределение зерен по всему объему дисков).

## Список использованных источников

1. Клубович, В. В. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на деформируемость сплавов золота / В. В. Клубович, В. А. Томило // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 2. – С. 5–8.
2. Малышев, В. М. Золото / В. М. Малышев, Д. В. Румянцев. – М.: Металлургия, 1979. – 288 с.
3. Северденко, В. П. Прокатка и волочение с ультразвуком / В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1970. – 280 с.

## References

1. Klubovich V.V., Tomilo V.A. Investigation of the effect of ultrasound on deformability of gold alloys. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2014, no. 2, pp. 5–8. (In Russian).
2. Malyshev V.M., Rummyantsev D.V. *Gold*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 288 p. (In Russian).
3. Severdenko V.P., Klubovich V.V., Stepanenko A.V. *Rolling and drawing with ultrasound*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1970. 280 p. (In Russian).

### Информация об авторах

*Клубович Владимир Владимирович* – академик, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией пластичности, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil\_p@bntu.by

*Кулак Михаил Михайлович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Людникова, 13, 210023, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: mmk\_vit@mail.ru

*Хрущёв Евгений Викторович* – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пластичности, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil\_p@bntu.by

### Для цитирования

Клубович, В. В. Разработка технологии изготовления зубопротезных дисков из сплавов золота и исследование их свойств / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Е. В. Хрущёв // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 52–58.

### Information about the authors

*Klubovich Vladimir Vladimirovich* – Academician, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Head of Research Laboratory of Materials Plasticity, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil\_p@bntu.by

*Kulak Mikhail Mikhaylovich* – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher of the Institute of Technical Acoustics (13, Lyudnikov Ave., 210023, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: mmk\_vit@mail.ru

*Khrushchev Evgeny Viktorovich* – Researcher of Research Laboratory of Materials Plasticity, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil\_p@bntu.by

### For citation

Klubovich V.V., Kulak M.M., Khrushchov E.V. Development of manufacturing techniques of dentoprosthetic disks from gold alloys and the research of their properties. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 52–58. (In Russian).