

УДК 621.771.

Лежнев С. Н.  
Волокитина И. Е.  
Волокитин А. В.

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ «ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ»

Проволока из различных металлов и сплавов занимает существенное место в общей структуре производства металлопроката. Однако существующие на сегодня производственные мощности не в состоянии удовлетворить возможный рост внутреннего спроса на проволоку. Поэтому развитие собственных мощностей, применение новейших технологий обработки алюминия, освоение новых способов обработки металлов давлением вот основные направления развития промышленности по производству алюминиевой проволоки.

Традиционные технологии деформирования, такие как волочение и холодная прокатка, сопровождаются измельчением структуры. Однако в основном субструктура имеет ячеистый характер с зернами, удлиненными в направлении волочения или прокатки, а также содержит высокую долю малоугловых границ. С другой стороны, материал, полученный интенсивной пластической деформацией (ИПД), содержит зернистую структуру с относительно мелкими зернами и высокими углами разориентировки [1]. Данный факт благоприятно сказывается на динамике рекристаллизации и, следовательно, на термостабильности. К тому же часть ИПД проходит при низких температурах (окружающей среды), что делает ее более привлекательной. Вместе с тем известно, что формирование ультрамелкозернистых и наноструктур с зернами размером менее одного микрона и особым состоянием границ может быть значительно (в 2–3 раза) повысить прочность технически чистых металлов и в 1,5–2 раза сплавов в сочетании с достаточно высокой степенью пластичности [2–5]. Наиболее известным способом получения металлов с ультрамелкозернистой структурой является способ РКУП [6–8], который в условиях многоциклового обработки обеспечивает формирование ультрамелкозернистой структуры в заготовках с высоким коэффициентом использования металла, что важно для промышленного использования. Известны некоторые результаты применения методов ИПД в машиностроительной и медицинской промышленности, позволившие снизить затраты на энергетические ресурсы на 20–30 %, но широкого применения они не нашли, так как получение такой структуры большинством известных способов трудо- и энергозатратно, а также накладывает ограничения на геометрические размеры получаемого продукта, что существенно снижает производительность [9–10].

Так на кафедре «Обработка металлов давлением» РГП «Карагандинский государственный индустриальный университет» проводится комплекс исследований по конструированию нового метода непрерывного деформирования проволоки из различных марок, основанного на совмещении волочения с РКУП. С одной стороны, необходимость проведения данных исследований обусловлена тем, что расширение рынка сбыта проволоки требует обеспечения такого сочетания прочностных и пластических свойств, которое достаточно сложно получить традиционными методами обработки. Поэтому с этой точки зрения формирование в проволоке ультрамелкозернистой структуры является единственно возможным вариантом. С другой стороны, при производстве проволоки основной операцией является волочение, которое, как известно, изучено теоретически и имеет хорошую техническую и технологическую оснащенность. Поэтому на данный момент представляет практический интерес разработка такого метода деформационного наноструктурирования, который по своим скоростным параметрам совместим со скоростями волочения на действующем промышленном оборудовании. При волочении основными деформациями, действующими на проволоку,

являются деформации растяжения и сжатия, а для формирования ультрамелкозернистой структуры металлов и сплавов необходимо воздействие деформаций сдвига на обрабатываемую проволоку. Так на кафедре был предложен новый способ деформирования проволоки – совмещенный процесс «прессование-волочение» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы, который позволяет получать проволоку с ультрамелкозернистой структурой, с применением калибрующего инструмента на выходе (рис. 1). Это позволяет, с одной стороны, получать сложную схему напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой проволоке за счет совмещения деформаций растяжения, сжатия и сдвига. А с другой стороны данная технология может быть внедрена на промышленные предприятия страны по производству проволоки так, как он не требует переоборудования существующих волочильных станов.

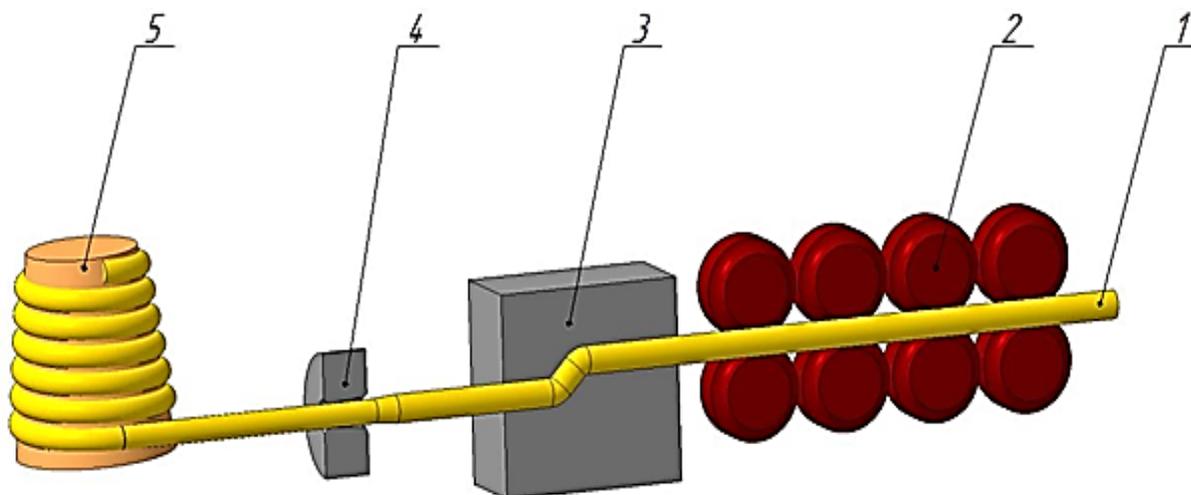


Рис. 1. Схема совмещенного процесса «прессование-волочение»:

1 – проволока; 2 – задающее устройство; 3 – равноканальная ступенчатая матрица; 4 – волока в волокодержателе; 5 – барабан наматывающий

Суть предлагаемого способа деформирования заключается в следующем. Предварительно заостренный конец проволоки задается в равноканальную ступенчатую матрицу, а затем последовательно в калибрующую волоку. По своей сути процесс задачи металла не отличается от задачи проволоки в волоку при стандартном процессе волочения. После того как конец заготовки выйдет из волоки, он закрепляется с помощью захватывающих клещей и наматывается на барабан волочильного стана. В данном случае процесс протягивания заготовки через равноканальную ступенчатую матрицу и калибрующую волоку реализуется за счет приложения к концу заготовки вытягивающей силы. Внешнюю нагрузку прикладывают к протягиваемому металлу, и на поверхности контакта металл-инструмент возникают контактные напряжения. В отличие от других способов обработки материалов давлением, реализация которых не может быть осуществлена без присутствия контактных сил трения, при волочении на разделе металл-инструмент, направленные против движения металла, являются негативными явлениями процесса, что, несомненно, подразумевает использование технологических смазок, уменьшающих трение.

Материалом исследования является технически чистая (99,9 %) медь марки М1. Деформирование методом «прессование-волочение» осуществлялось в три прохода. Начальный диаметр исходной заготовки составлял 7,0 мм. После первого, второго и третьего проходов в контейнер для смазки устанавливали новую равноканальную ступенчатую матрицу и волоку с меньшим диаметром канала. В качестве смазки использовали стружку мыла.

Подготовку образцов для металлографического анализа осуществляли на устройстве электролитической пробоподготовки Struers. Все образцы были исследованы в средней плоскости образца, чтобы избежать влияния периферийных областей. Получаемые образцы рассматривались в двух сечениях: поперечном и продольном.

Тонкую структуру исследовали на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM2100 в диапазоне увеличений от 1000 до 50000 раз. Объекты для ПЭМ готовили струйной полировкой на приборе Tenipol-3 при комнатной температуре и напряжении 25 В в 7 % растворе  $H_3PO_4$  в дистиллированной воде. Размер ячеек (субзерен) оценивали методом случайных секущих.

Микроструктурные исследования показали, что в исходном состоянии медь имеет крупнозернистую структуру с большим наличием двойников (рис. 2, а) и средним размером зерна 20 мкм. Уже после первого цикла прессования-волочения структура меди сильно измельчается по сравнению с исходной. После третьего прохода в структуре наблюдается значительное повышение доли большеугловых границ и размер зерен составляет около 1,5 мкм.

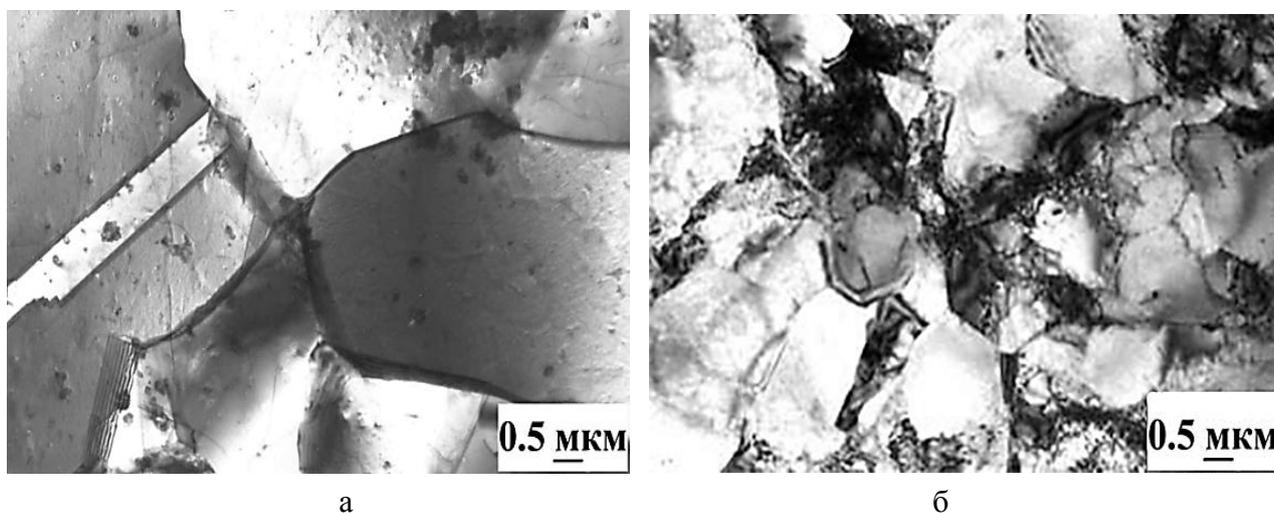


Рис. 2. Микроструктура меди:

а – исходное состояние; б – прессование-волочение

При проведении исследований было выявлено, что формирование ультрамелкозернистой структуры при прессовании-волочении носит стадийный характер. Первая стадия соответствует небольшим степеням деформации – первые два прохода. Для нее характерно возникновение ячеистой структуры: дислокации так перераспределяются в объеме зерна, что их сплетения образуют размытые стенки (границы), окружающие области, внутри которых плотность дислокаций заметно меньше, чем в стенках. С увеличением степени деформации в области средних и больших деформаций размер ячеек мало меняется, а плотность дислокаций в их размытых границах возрастает. При увеличении степени деформации происходит образование клубков и сплетений дислокаций, постепенно заполняющих весь объем исходных зерен, что приводит к некоторому уменьшению среднего размера ячеек. К более поздней стадии для меди относится двойникование. Этот процесс активизируется, когда возникающие при деформации области разориентации (ячейки) приобретают настолько малые размеры, что генерация в них решеточных дислокаций становится невозможной. Двойниковые границы отличаются когерентным строением и хаотичным распределением в металле. Поэтому приводящие к их образованию специфичные кристаллографические сдвиги не вносят заметного вклада в активную деформацию металла. В этой связи двойникование является вспомогательным механизмом для измельчения зерен.

Помимо исследования изменения размера зерна при деформировании по действующей и предлагаемой технологии нами были исследованы механические свойства медной проволоки после каждого цикла деформирования по действующей и предлагаемой технологии деформирования, графики которых представлены на рис. 3.

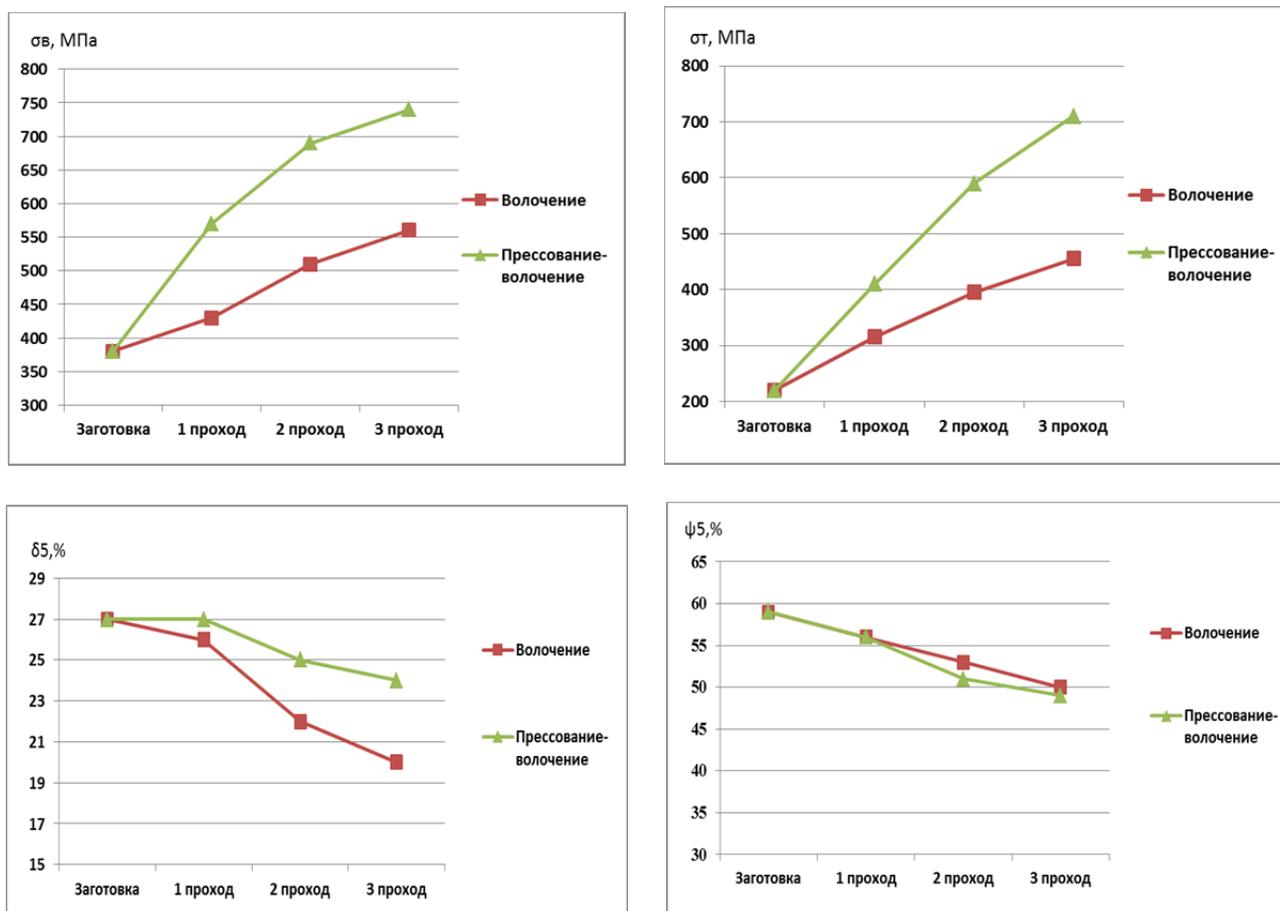


Рис. 3. Графики зависимости механических свойств медной проволоки от количества проходов

Анализ графиков показал, что по обеим методикам наблюдается увеличение прочностных характеристик с увеличением количества проходов, пластические характеристики же падают, но по предложенной методике относительное удлинение после третьего прохода выше на 36 %, чем при традиционном волочении. Измерение предела прочности показало, что сочетание метода «прессование-волочение» обеспечивает значительный прирост уровня прочности по сравнению с исходным состоянием и на 20 % превышает показатели прочности традиционного волочения после третьего прохода.

Из графика, приведенного на рис. 4, видно, что предел прочности медной проволоки, подвергшейся совмещенному процессу «прессование-волочение», после третьего прохода увеличился на 180 МПа по сравнению с проволокой, прошедшей классическое волочение. А предел текучести проволоки после третьего прохода с использованием совмещенного процесса увеличился на 255 МПа по сравнению с проволокой, прошедшей классический способ волочения.

Как известно из соотношения Холла-Петча, размер зерна поликристаллических металлов оказывает большое влияние на величину предела текучести и механические свойства материала. Решающую роль в высокой прочности ультрамелкозернистого сплава играет дополнительное упрочнение благодаря высокой плотности дислокаций вдоль границ зерна.

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что значения механических характеристик проволоки, продеформированной по новой технологии «прессование-волочение», выше, чем у проволоки, полученной традиционным волочением. При этом уровень прочностных характеристик обычного волочения достижим по новой технологии «прессование-волочение» за меньшее количество проходов, что создает предпосылки к снижению интенсивности использования рабочего инструмента, а, следовательно, и меньшего его износа, и затрат энергетических и материальных ресурсов.

### ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что предлагаемый совмещенный способ деформирования «прессование-волочение» обладает существенным преимуществом по сравнению с действующей технологией производства алюминиевой проволоки. Данный способ деформирования за счет совмещения двух способов: интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения через волоку, позволяет получать алюминиевую проволоку с субультрамелкозернистой структурой, требуемых размеров и формы поперечного сечения при незначительном количестве циклов деформирования. Так же хочется отметить, что данный способ деформирования при внедрении его в производство не требует значительных экономических вложений и существенного переоборудования существующих волочильных станов. Так как для реализации данного совмещенного процесса требуется только добавление в конструкцию оборудования специально изготовленной равноканальной ступенчатой матрицы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. З. *Использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов* / Р. З. Валиев, Г. И. Рааб, М. Ю. Мурашкин // *Кузнечно-штамповое производство*. – 2008. – № 11. – С. 5–12.
2. *Research of influence equal channel angular pressing combined with a heat treatment on the microstructure of the steel 45* / A. B. Nayzabekov, S. N. Lezhnev, G. G. Kurapov, M. J. Knapinski, I. E. Volokitina // *XV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE New technologies and achievements in metallurgy : material engineering and production engineering. Series : Monografie Nr 40, Czestochowa, 2014 r.* – P. 365–368.
3. *Influence of Initial Structural State of 35HM Steel on the Obtaining Ultrafinegrained Structure During ECA-pressing* / I. E. Volokitina, A. B. Nayzabekov, S. N. Lezhnev, G. G. Kurapov, M. J. Knapinski // *The 3rd IIV South – East European welding congress «Welding and Joining Technologies for a sustainable development and environment», Romania, 2015.*
4. *Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform* / Raab G., Valiev R., Lowe T., Zhu Y. // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – № 382. – P. 30–34.
5. *Strain hardenability of ultrafine grained low carbon steels processed by ECAP* / Kyung-Tae Park, Chong Soo Lee, Dong Hyuk Shin // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – № 10. – P. 133–137.
6. *Murashkin M. Yu. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC* / M. Yu. Murashkin, I. Sabirov, V. U. Kazykhanov // *Journal of Materials Science*. – 2013. – № 48. – P. 4501–4509.
7. *Azbanbaev E. M. The technology of production of metals and recycled materials* / E. M. Azbanbaev. – 2011. – № 1. – P. 12–16.
8. *The effect of powder preparation method on the corrosion and mechanical properties of TiN – based coating by reactive plasma spraying* / Mao Z. P., Ma J., Wang J., Sun B. D. // *Applied surface science, 6:3784-3788.ethod : Ultrafine Grained Materials IV TMS Meeting, 2009.* – № 1. – P. 189–194.
9. *Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys Subjected to Equal Channel Angular Pressing* / Qu S., An X. H., Yang H. J., Huang C. X., Yang G., Zang Q. S., Wang Z. G., Wu S. D., Zhang Z. F. // *Acta Materialia*. – 2009. – № 5. – P. 1586–1601.
10. *Kawasaki M. Microstructural Evolution in High Purity Aluminum Processed by ECAP* / M. Kawaskia, Z. Horitab, T. G. Langdona // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – № 2. – P. 143–150.

### REFERENCES

1. *Valiev R. Z. Ispol'zovanie metodov intensivnoj plasticheskoj deformacii dlja poluchenija obemnyh nanostrukturnyh metallov i splavov* / R. Z. Valiev, G. I. Raab, M. Ju. Murashkin // *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo*. – 2008. – № 11. – С. 5–12.

2. *Research of influence equal channel angular pressing combined with a heat treatment on the microstructure of the steel 45 / A. B. Nayzabekov, S. N. Lezhnev, G. G. Kurapov, M. J. Knapinski, I. E. Volokitina // XV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE New technologies and achievements in metallurgy : material engineering and production engineering. Series : Monografie Nr 40, Czestochowa, 2014 r. – P. 365–368.*
3. *Influence of Initial Structural State of 35HM Steel on the Obtaining Ultrafinegrained Structure During ECA-pressing / I. E. Volokitina, A. B. Nayzabekov, S. N. Lezhnev, G. G. Kurapov, M. J. Knapinski // The 3rd IAW South – East European welding congress «Welding and Joining Technologies for a sustainable development and environment», Romania, 2015.*
4. *Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform / Raab G., Valiev R., Lowe T., Zhu Y. // Materials Science and Engineering. – 2004. – № 382. – P. 30–34.*
5. *Strain hardenability of ultrafine grained low carbon steels processed by ECAP / Kyung-Tae Park, Chong Soo Lee, Dong Hyuk Shin // Rev. Adv. Mater. Sci. – № 10. – P. 133–137.*
6. *Murashkin M. Yu. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC / M. Yu. Murashkin, I. Sabirov, V. U. Kazykhanov // Journal of Materials Science. – 2013. – № 48. – P. 4501–4509.*
7. *Azbanbaev E. M. The technology of production of metals and recycled materials / E. M. Azbanbaev. – 2011. – № 1. – P. 12–16.*
8. *The effect of powder preparation method on the corrosion and mechanical properties of TiN – based coating by reactive plasma spraying / Mao Z. P., Ma J., Wang J., Sun B. D. // Applied surface science, 6:3784-3788.ethod : Ultrafine Grained Materials IV TMS Meeting, 2009. – № 1. – P. 189–194.*
9. *Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Cu-Al Alloys Subjected to Equal Channel Angular Pressing / Qu S., An X. H., Yang H. J., Huang C. X., Yang G., Zang Q. S., Wang Z. G., Wu S. D., Zhang Z. F. // Acta Materialia. – 2009. – № 5. – P. 1586–1601.*
10. *Kawasakia M. Microstructural Evolution in High Purity Aluminum Processed by ECAP / M. Kawasakia, Z. Horitab, T. G. Langdona // Materials Science and Engineering A. – 2009. – № 2. – P. 143–150.*

Лежнев С. Н. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД КГИУ;

Волокитина И. Е. – PhD, стар. преп. каф. ОМД КГИУ;

Волокитин А. В. – докторант PhD, магистр КазННТУ им. К. И. Сатпаева.

КГИУ – Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан.

КазННТУ им. К. И. Сатпаева – Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан.

E-mail: sergey\_legnev@mail.ru; irinka.vav@mail.ru; dyusha.vav@mail.ru.

*Стаття надійшла до редакції 12.12.2017 р.*