

УДК 621.787.4-977

Анищенко А. С.
Кухарь В. В.
Присяжный А. Г.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОЛЬЦЕРАСКАТКИ ТИТАНОВЫХ ПОКОВОК С ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

К современным судовым конструкциям предъявляются жесткие требования по обеспечению минимальной массы и одновременно высоких прочностных показателей при эксплуатации в морской воде. Перспективным материалом для корпусов судов являются титановые сплавы, характеризующиеся малой плотностью, высоким сопротивлением цикловым нагрузкам и коррозионной стойкостью [1, 2]. Однако, большинство легированных титановых сплавов малотехнологичны. В зависимости от способов обработки давлением в поковках из таких сплавов фиксируется значительный разбег значений механических, физических и других иных свойств по сечению, высоте и т. п.

Одной из оптимальных технологий производства кольцевых титановых поковок является их горячая раскатка на кольцераскатных станах полузакрытого типа [3], позволяющих осуществлять радиальную и высотную деформацию с циклическим приложением нагрузки и программируемым регулированием температурно-скоростных и деформационных режимов.

Серийное производство поковок, в том числе из титановых сплавов, на этих станах обеспечивает высокую прибыль за счет точности размеров поковок и производительности процесса [4, 5]. Вместе с этим, использование в качестве исходного материала ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов усложняет технологию производства поковок из-за необходимости деформирования в узком диапазоне температур ($\alpha+\beta$)-области, строгой регламентации деформационно-скоростных условий формоизменения по переходам, а также высокой чувствительности физико-механических свойств титановых сплавов к вышеназванным параметрам деформирования. В частности, в кольцевых поковках из ($\alpha+\beta$)-сплавов титана имеют место существенные различия значений коррозионно-усталостной прочности.

Цель работы – разработка температурных и деформационных режимов раскатки кольцевых поковок из титановых сплавов, обеспечивающих их высокий уровень и минимальный разбег контролируемых показателей коррозионно-усталостной прочности.

В качестве исходных заготовок использовали поковки диаметром 450...600 мм из титанового сплава 5В, изготовленные вакуумно-дуговым переплавом и последующей ковкой на гидравлическом прессе. Сплав 5В системы Ti-Al-V [2, 5] имеет ($\alpha+\beta$)-структуру, обладает повышенными прочностными свойствами, коррозионной стойкостью, низкой технологичностью и используется в корпусных конструкциях судов надводного и подводного плавания.

Эксперименты по осадке, прошивке и раскатке кольцевых поковок проводили в производственных условиях на кольцераскатном комплексе (рис. 1), состоящем из стана RAW 315/260 – 2000/400S, пяти кольцевых и камерных печей, четырех гусеничных манипуляторов «Andromat» и гидропресса модели PStPÖ1Z-4000 усилием 40 МН [3, 4].

Гидропресс обеспечивал точную центровку осей заготовки и главного гидроцилиндра за счет центрирующего устройства, расположенного между колоннами пресса (рис. 2). В результате при осадке устранялась вероятность продольного изгиба для заготовок с соотношением высоты к диаметру $H_0/D_0 \leq 3,3$. Однако при этом перпендикулярность торцов относительно оси заготовок должна была быть в пределах $\leq 0,5^\circ$ на 100 мм длины.

Пресс также был снабжен специальным поворотным рукавом, который подводил и центрировал прошивень относительно оси заготовки. Вследствие этого в бандажах после прошивки снижалась неравномерность толщины стенок, что обеспечивало при раскатке точность размеров колец.



Рис. 1. Стан для раскатки кольцевых заготовок



Рис. 2. Гидропресс для осадки и прошивки заготовок

На первой стадии исследований экспериментально-промышленным путем была создана следующая технология кольцевых поковок из сплава 5В:

1. Резка исходных титановых поковок диаметром 450...600 мм на токарных станках до диаметра 300 мм (для обеспечения требуемой неперпендикулярности торцов), далее – на дисковых пилах (для снижения трудоемкости процесса).

2. Обдирка поверхности заготовок на глубину не менее 10 мм с обеспечением шероховатости не ниже $\sqrt{R_z} 40$.

3. Нагрев заготовок в кольцевой печи до 1100 ± 20 °С в течение 150...240 мин. Садку заготовок в печь осуществляли на подставки из огнеупорного кирпича, выложенные на поду печи, чтобы исключить контакт титанового сплава с железной окалиной, который может привести к взрыву.

4. Осадка нагретых поковок со степенью деформации 10...75%. Гидропресс с центрирующим заготовку устройством позволял осадку с $H_0 / D_0 \leq 3,3$, т.е. со степенью деформации, близкой к верхнему пределу (75%), что улучшало структуру металла и формировало в нем благоприятную текстуру перед раскаткой. Оптимальная высота осаженой и прошивной заготовки была на 30...80 мм больше высоты раскатанного кольца.

5. Нагрев или подогрев бандажей с толщиной стенки 50...250 мм после прошивки в нагревательной печи раскатного стана до 980...1000 °С в течение 30...100 мин.

6. Раскатка кольцевых поковок (с толщиной стенки менее 100 мм) в два перехода с двух нагревов. На первом переходе бандаж раскатывали на толщину стенки 200...250 мм, после чего металл подогревали до 1000 °С и раскатывали на готовый размер. Величина суммарной степени деформации стенки на окончательной стадии раскатки была не более 60%. Температура конца раскатки – не менее 850 °С. Соотношение радиальной и высотной деформации кольцевых поковок выбирали таким, чтобы их поперечные сечения вплоть до последних стадий раскатки имели форму, подобную форме исходного сечения бандажей.

При раскатке колец из сплава 5В одним из регламентированных параметров поковок был предел выносливости сплава 5В на коррозионно-усталостную прочность σ_{-1} , который определялся при растяжении и сжатии образцов в морской воде с симметричным циклом нагрузки (число циклов - 10^7). Циклическую нагрузку прикладывали к плоскостям образцов, перпендикулярным радиусу и касательным к боковой поверхности кольцевых поковок. Значение σ_{-1} не должно было быть менее 520 МПа для обоих случаев приложения нагрузки.

Стандартные режимы раскатки кольцевых поковок из рядовых марок сталей, которые первоначально использовали при деформировании титановых поковок, характеризовались значительным превышением суммарной степени деформации полуфабриката (бандажа) на раскатном стане, над степенью деформации исходной заготовки на гидропрессе. При этом

текстура титановых колец во многом определялась наличием зерен с очень вытянутой формой в тангенциальном направлении.

Образцы, вырезанные из колец в тангенциальном и радиальном направлении относительно их осей, показывали большое расхождение показателей σ_{-1} .

Пределы выносливости (соответственно σ_{-1}^R и σ_{-1}^t), которые фиксировались при нагрузке, заметно отличались друг от друга из-за сильно развитой текстуры деформации в кольцах при однопереходной раскатке или формоизменения в неоптимальных температурно-деформационных режимах. Предел выносливости в тангенциальном направлении σ_{-1}^t превышал значение 520 МПа, регламентируемое условиями изготовления кольцевых поковок. А в радиальном направлении предел выносливости σ_{-1}^R был ниже 520 МПа.

Таким образом, возникла задача разработать новый термомеханический режим деформирования, обеспечивающий минимальное текстурообразование в кольцевых поковках и, следовательно, минимальный разброс значений $\delta = \sigma_{-1}^t - \sigma_{-1}^R$.

Температурные режимы деформирования были выбраны по результатам исследований, изложенных в источниках [2, 6]:

- осадка и прошивка – при температуре, на 30...80 °С ниже температуры ($\alpha+\beta$)-перехода сплава 5В (1040 °С);
- раскатка – при температуре на 50...100 °С ниже температуры ($\alpha+\beta$)-перехода сплава 5В.

Поскольку в готовых кольцевых поковках должна быть ($\alpha+\beta$)-структура, нагрев заготовок не выполняли выше 1040 °С. С учетом деформационного разогрева температура нагрева при осадке должна была быть не менее чем на 300 °С, а при раскатке – не менее чем на 500 °С ниже температуры 1040 °С. Нижняя граница температур нагрева (850 °С) была обусловлена резким падением пластичности сплава 5В при более низких температурах деформирования.

Номенклатура кольцевых поковок включала кольца диаметром от 800 до 1200 мм. Исходные заготовки имели диаметр от 450 до 600 мм. В связи с этим даже для колец одного диаметра (и массы) использовали заготовки с различной относительной высотой $H_0/D_0 = 2,2...3,3$, что обуславливало достаточно широкий диапазон степеней деформации (10...75 %) при осадке. Перераспределение деформаций при осадке, прошивке и раскатке можно было проводить за счет изменения высоты H_0/D_0 и высоты осаженого и прошитого бандажа. Поскольку при раскатке принципиально важно соблюдать сходство поперечных сечений бандажа и готового кольца, погрешность высоты исходного бандажа не превышала $\pm 15\%$ от оптимального расчетного значения. В этих условиях можно было деформировать заготовки под прессом с коэффициентом укова $K_u = 1,63-3,78$ ($K_u = H_0 / H_k$, где H_0 и H_k – начальная и конечная высота заготовки при осадке).

На рис. 3 показана зависимость показателей σ_{-1}^R и σ_{-1}^t от коэффициента укова при деформировании на прессе и дальнейшей однопереходной раскатке бандажа на стане. Графики показывают, что разность δ наибольшая для колец диаметром 800 мм при минимальном коэффициенте укова, достигаемом деформированием заготовки на прессе. Её значение составляет 70...90 МПа. Рост K_u снижает δ до 35–50 МПа при $K_u = 3,60$. Деформация с $K_u = 3,78$ ведет к разрушению заготовки. Увеличение диаметра колец до 1000 и 1200 мм немного уменьшает δ : для колец диаметром 1000 мм $\delta = 70...90$ и $30...45$ МПа соответственно при $K_u = 1,63...3,60$; для колец диаметром 1200 мм $\delta = 60...80$ и $40...45$ МПа. При этом абсолютные значения σ_{-1}^R и σ_{-1}^t возрастают при увеличении диаметра колец.

Раскатка бандажей за два перехода с промежуточным двадцатиминутным отжигом при 1000 °С увеличивает на 5...8 % показатели σ_{-1}^R и σ_{-1}^t (рис. 4) по сравнению с соответствующими показателями на рис. 3. Кроме того, отмечается снижение разницы δ :

- для колец с диаметром 800 мм $\delta = 60...80$ МПа при $K_u = 1,63$ и $\delta = 25...35$ МПа при $K_u = 3,60$;
- для колец с диаметром 1000 мм $\delta = 50...60$ МПа при $K_u = 1,63$ и $\delta = 25...35$ МПа при $K_u = 3,60$;
- для колец с диаметром 1200 мм $\delta = 60...70$ МПа при $K_u = 1,63$ и $\delta = 30...40$ МПа при $K_u = 3,60$.

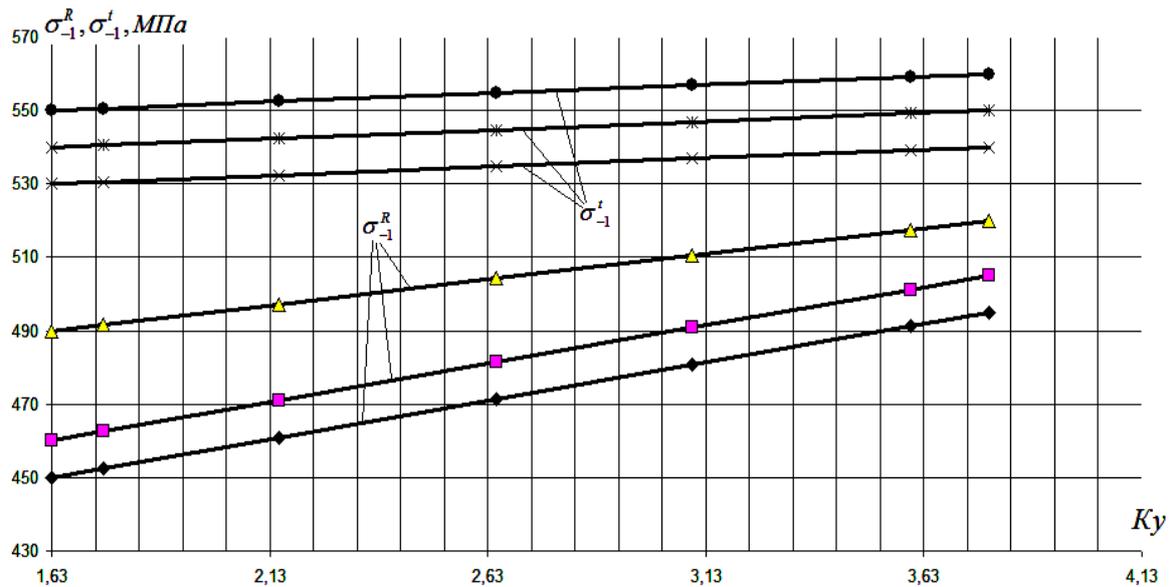


Рис. 3. Влияние коэффициента укова K_u на σ_{-1}^R и σ_{-1}^t при изготовлении кольцевых поковок по схеме «осадка + прошивка + раскатка за один переход»:

▲—▲, ●—● — диаметр кольца 1200 мм; ■—■, *—* — диаметр кольца 1000 мм; ◆—◆, ×—× — диаметр кольца 800 мм

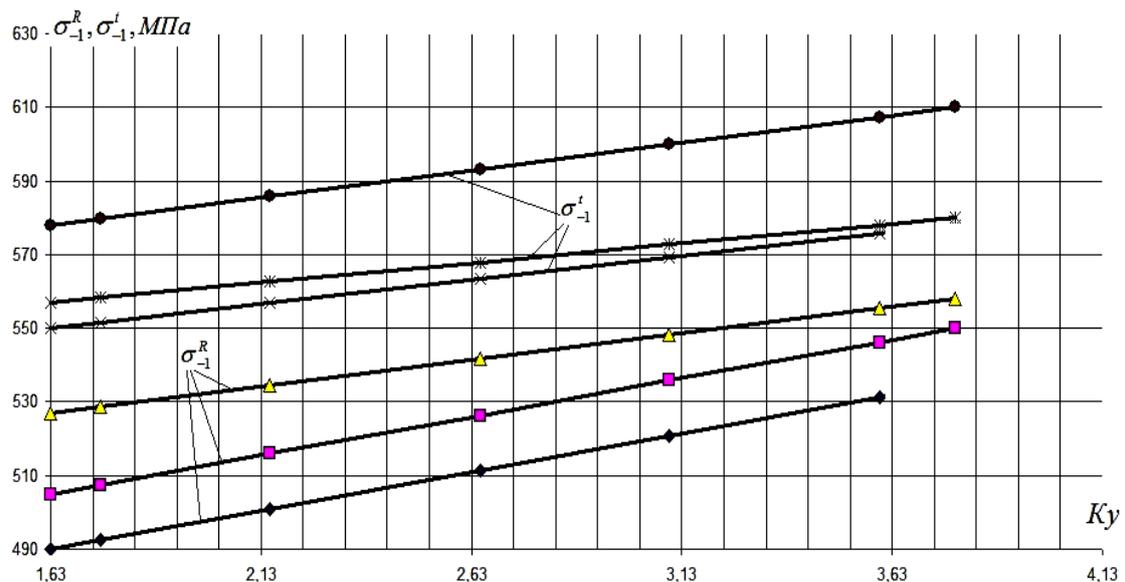


Рис. 4. Влияние коэффициента укова K_u на σ_{-1}^R и σ_{-1}^t при изготовлении кольцевых поковок по схеме «осадка + прошивка + раскатка за 2 перехода с 20-минутным отжигом при 1000 °С» (обозначения — см. рис. 3)

Все кольца диаметром 1200 мм имеют предел выносливости не менее 520 МПа. Кольца диаметром 1000 мм имеют $\sigma_{-1} \geq 520$ МПа при $K_u > 1,8-1,9$, а диаметром 800 мм – при $K_u > 2,60-2,75$.

Увеличение времени отжига до 60 минут (см. рис. 5) ведет к снижению анизотропии показателя σ_{-1} как за счет увеличения показателей σ_{-1}^R , так и за счет уменьшения показателей σ_{-1}^t . В пределах $K_u = 1,75...3,60$ все кольца имеют показатель $\sigma_{-1} \geq 520$ МПа.

Для кольцевых поковок всех диаметров $\delta = 25...40$ МПа при $K_u = 1,75$ и $\delta = 15...35$ МПа при $K_u = 3,60$.

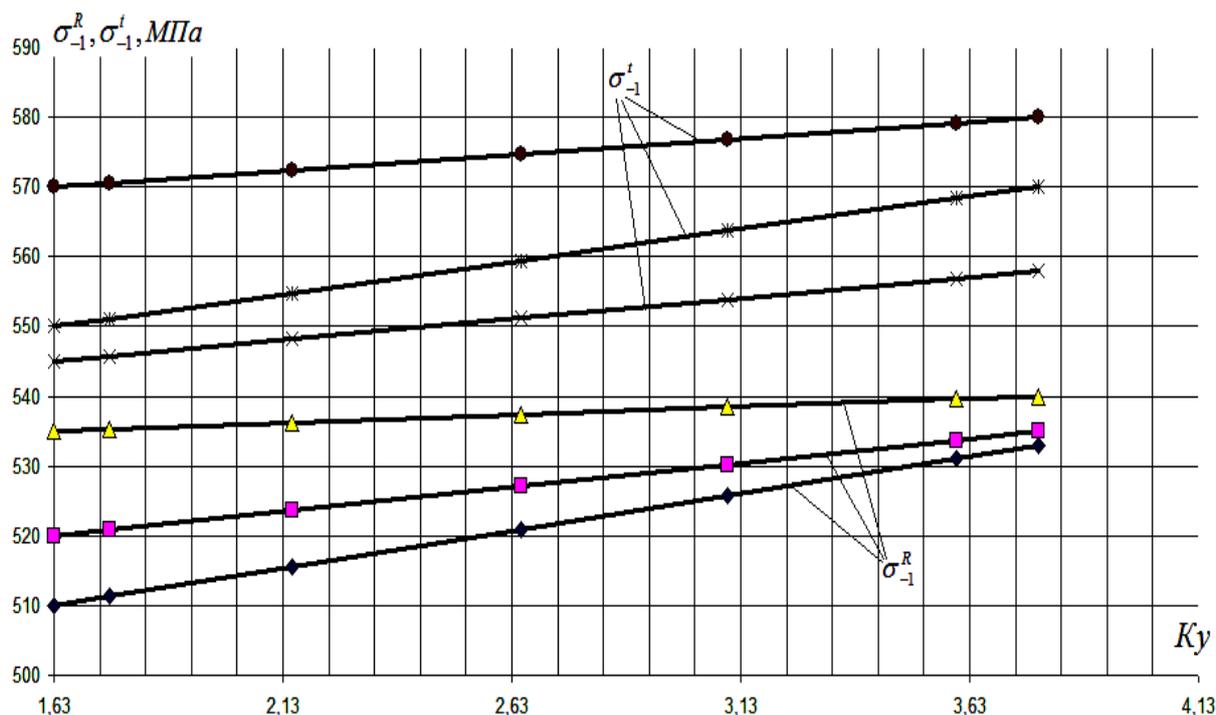


Рис. 5. Влияние коэффициента укова K_u на σ_{-1}^t и σ_{-1}^R при изготовлении кольцевых поковок по схеме «осадка + прошивка + раскатка в 2 перехода с 60-минутным отжигом при 1000 °С» (обозначения – см. рис. 3)

Таким образом, на базе вышеприведенных экспериментов, осуществленных в производственных условиях, была разработана технология, которая позволила до минимума снизить текстуру деформации в кольцах и тем самым в значительной степени устранить различия значений σ_{-1}^t и σ_{-1}^R . Согласно технологии, осадку и прошивку заготовок проводили при температуре на 30...80 °С ниже температуры ($\alpha + \beta$)-перехода сплава 5В (1040 °С) с коэффициентом укова $K_u = 1,75...3,60$. При дальнейшей раскатке в два перехода бандажи нагревали до 940...980 °С и раскатывали с соотношением коэффициентов обжатия в пределах $K_{P1}/K_{P2} = 1,2...0,8$, где $K_{P1} = F_1/F_2$, здесь F_1 и F_2 – площади поперечного сечения кольца до и после раскатки на соответствующем переходе.

Формоизменение колец в таких условиях обеспечивает взаимную компенсацию влияния текстур осадки и раскатки на анизотропию предела выносливости сплава 5В.

ВЫВОДЫ

1. Разработана технология изготовления кольцевых поковок из титанового сплава 5В, позволяющая за счет осадки и прошивки аномально высоких заготовок с большим коэффи-

циентом укова и двухпереходной раскатки бандажей с примерно равными коэффициентами обжатия по переходам обеспечить высокую точность размеров поковок и уровень их физико-механических свойств.

2. Экспериментально установлено влияние текстуры деформации, образующейся на стадиях осадки, прошивки и раскатки, на величину и разбег значений параметров коррозионно-усталостной прочности поковок из сплава 5В.

3. Создан технологический режим деформации поковок из титанового сплава 5В при температурах ($\alpha+\beta$)-области, который включает деформацию на прессе (осадка, прошивка) с коэффициентом укова $K_u = 1,75 \dots 3,60$ и раскатку в два перехода бандажей с соотношением коэффициентов обжатия в пределах $K_{P1} / K_{P2} = 1,2 \dots 0,8$. Такой режим обеспечивает минимальный разбег значений параметров σ_{-1}^t и σ_{-1}^R , при этом каждый из них имеет значение не менее, чем 540 МПа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А. А. *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства* / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Польшкин. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Никольский Л. А. *Горячая штамповка заготовок из титановых сплавов* / Л. А. Никольский. – М. : Машиностроение, 1964. – 228 с.
3. *Кольцепрокатные станы «Wagner Banning» [Электронный ресурс]*. – Режим доступа : <http://www.sms-meer.com/>.
4. Анищенко А. С. *Горячая раскатка точных кольцевых поковок* / А. С. Анищенко, Ю. В. Феофанов, А. Б. Богун // *Химическое и нефтяное машиностроение*, 1992. – № 11. – С. 33–35.
5. Анищенко А. С. *Совершенствование технологии раскатки кольцевых титановых поковок* / А. С. Анищенко, С. Б. Каргин // *Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 46. – С. 14–18.*
6. *Сверхпластичность некоторых титановых сплавов* / Р. К. Аубакирова, А. А. Пресняков, С. С. Ушков, А. Н. Байдельдинова. – Алма-Ата : Наука, 1987. – 212 с.

REFERENCES

1. Il'in A. A. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva* / A. A. Il'in, B. A. Kolachev, I. S. Pol'kin. – M. : VILS-MATI, 2009. – 520 s.
2. Nikol'skij L. A. *Gorjachaja shtampovka zagotovok iz titanovyh splavov* / L. A. Nikol'skij. – M. : Mashinostroenie, 1964. – 228 s.
3. *Kol'ceprokatnye stany «Wagner Banning» [Elektronnyj resurs]*. – Rezhim dostupa : <http://www.sms-meer.com/>.
4. Anishhenko A. S. *Gorjachaja raskatka tochnyh kol'cevych pokovok* / A. S. Anishhenko, Ju. V. Feofanov, A. B. Bogun // *Himicheskoe i nefljanoe mashinostroenie*, 1992. – № 11. – S. 33–35.
5. Anishhenko A. S. *Sovershenstvovanie tehnologii raskatki kol'cevych titanovyh poko-vok* / A. S. Anishhenko, S. B. Kargin // *Visnik NTU «HPI» : zb. nauk. pr. – Harkiv : NTU «HPI», 2011. – № 46. – S. 14–18.*
6. *Sverhplastichnost' nekotoryh titanovyh splavov* / R. K. Aubakirova, A. A. Presnjakov, S. S. Ushkov, A. N. Bajdel'dinova. – Alma-Ata : Nauka, 1987. – 212 s.

Анищенко А. С. – канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «ПГТУ»;
Кухарь В. В. – д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»;
Присяжный А. Г. – доц. ГВУЗ «ПГТУ».

ГВУЗ «ПГТУ» – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

E-mail: kvv_mariupol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.09.2015 г.