

Микроструктура и механические свойства стали AISI 316 в процессе кручения под высоким давлением

¹**ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич**, PhD, старший преподаватель, *dyusha.vav@mail.ru*,

²**НАЙЗАБЕКОВ Абдрахман Батырбекович**, д.т.н., профессор, *naizabekov57@mail.ru*,

²**ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна**, PhD, доцент, *irinka.vav@mail.ru*,

¹**БОБРОВ Антон Алексеевич**, магистрант, *toxa.87.20@mail.ru*,

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,

²Рудненский индустриальный институт, Казахстан, 111500, Рудный, ул. 50 лет Октября, 38,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Исследовано влияние процесса кручения под высоким давлением в новом штампе на структуру и механические свойства коррозионностойкой стали AISI 316. Деформирование проводилось при комнатной температуре, количество циклов деформирования – 7. В процессе кручения под высоким давлением существенно измельчается структура образцов до наноструктурной, так, сталь AISI 316 со средним размером зерна 30 мкм после деформирования измельчилась до 80-100 нм. Значения предела прочности и предела текучести увеличиваются за семь проходов с 595 до 1590 МПа и с 320 до 870 МПа соответственно. Относительное удлинение меняется с 55 до 25%, однако остается на достаточном для применения уровне. Исходная структура недеформированной стали обладает хорошей пластичностью и проявляет типичные признаки пластичного разрушения. Но с увеличением циклов КВД механизм разрушения меняется с пластичного на хрупкий, что свидетельствует о снижении пластичности нержавеющей стали AISI 316.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, кручение под высоким давлением, микроструктура, сталь, механические свойства, фрактография, растяжение, ультрамелкозернистая структура, деформация, микротвердость.

Введение

Растущие требования, предъявляемые к современным материалам, заставляют совершенствовать процессы их изготовления, чтобы добиться выгодного сочетания механических свойств, т. е. высокой прочности без потери пластичности. Особого внимания из-за высоких прочностных свойств заслуживают материалы, характеризующиеся сильно измельченными структурами.

За последнее десятилетие было проведено множество исследований по получению ультратонких зернистых и нанокристаллических материалов. Эти еще не до конца изученные виды материалов стали все более востребованными с развитием новых эффективных методов интенсивной пластической деформации (ИПД), таких как кручение под высоким давлением (КВД), всесторонняя ковка, равноканальное угловое прессование (РКУП) и т.д. [1-3]. Все вышеперечисленные методы объединяет то, что крупнозернистый, объемный материал обрабатывается путем интенсивного деформирования в ультрамелкозернистую или даже наноразмерную микроструктуру. Среди различных методов ИПД наиболее часто используются РКУП и КВД [4-6]. Одним из са-

мых важных недостатков процесса КВД является то, что приложенная деформация изменяется по всему образцу, а в центре диска почти, что сводится к нулю. Как следствие, следует предположить, что микроструктура, создаваемая КВД, будет неоднородной. Тем не менее, имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные позволяют предположить, что во многих материалах имеется потенциал для достижения постепенной эволюции в достаточно однородную микроструктуру. Имеются результаты для аустенитной стали [7-9] о значительных вариациях значений микротвердости по диаметрам дисков, обработанных КВД, с более низкими значениями твердости в центрах дисков и более высокими значениями в периферийных областях.

Материал и методика исследования

Так как в нашем случае методом КВД будут обрабатываться не диски, а кольца, то выше описанного недостатка можно избежать. Поэтому целью исследования является изучение структуры и механических свойств колец из аустенитной стали AISI 316 после КВД в новой матрице при комнатной температуре. Конструкция новой матрицы

для КВД показана в статье [10].

Исходная заготовка имела кольцевую форму диаметром 76 мм, шириной 3,5 мм и толщиной 3 мм. В качестве материала заготовки была выбрана нержавеющая сталь аустенитного класса AISI-316.

Лабораторный эксперимент проводился на кривошипном горячештамповочном одностоечном прессе усилием 1000 кН модели ПБ 6330-02. Деформирование проводили при комнатной температуре, так как в аустенитных сталях наблюдается мартенситное превращение и, в зависимости от температуры деформации, количество мартенсита в структуре может меняться. Количество циклов деформирования – 7.

Металлографический анализ всех исследованных образцов в поперечном и продольном сечениях проводили с помощью электронного просвечивающего микроскопа JEM2100. Все образцы были протестированы в средней плоскости, чтобы избежать влияния периферийных областей. Подготовка образцов для металлографического анализа проводилась на установке электролитической пробоподготовки Struers.

Механические испытания на одноосное растяжение проводили при комнатной температуре на машине Instron 5882 со скоростью деформации 1,0 мм/мин. Деформация образца измерялась тензомером фирмы Instron. Испытания на растяжение проводили на плоских образцах, вырезанных из кольца (размеры рабочей части 3,0x3,0x6,0 мм) в соответствии с рекомендациями ГОСТ 1497-84. По результатам испытаний механических свойств на растяжение определялись характеристики прочности и пластичности: предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B) и максимальное удлинение до разрушения (δ).

Микротвердость по методу Виккерса определялась с использованием автоматического микротвердомера DM-8 (Affri) в трех областях проволоки (центр, половина радиуса и периферия).

Результаты и их обсуждение

Полученная после деформирования микроструктура показана на рисунке 1. Из рисунка 1а видно, что микроструктура до КВД является крупнозернистой, со средним размером зерна 30 мкм. В исходной структуре аустенитной стали AISI 316 содержится $\approx 100\%$ аустенита, зерна полиэдрической формы с тонкими границами и двойниками отжига.

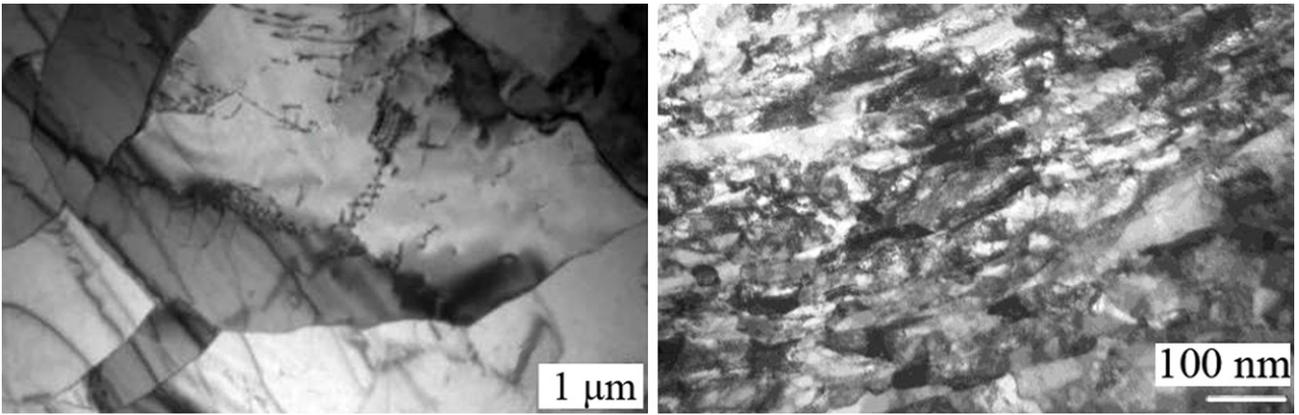
После 1 цикла деформирования в аустените появляются двойники деформации. При увеличении количества циклов до 2 происходит увеличение количества дислокаций вблизи границ зерен, так как границы являются барьером для движения дислокаций. После 3 циклов деформирования в структуре аустенита отмечается большое количество скопления дислокаций, примыкающих к деформационным двойникам. В аустените из-за высокого уровня энергии дефекта упаковки многие деформационные дислокации аннигилируют, а

другие перестраиваются в дислокационные ячейки, а затем превращаются в зерна, имеющие границы зерен с большими углами разориентации. При увеличении количества циклов до 5 размер зерен аустенита еще больше уменьшается до 0,3 мкм, появляются полосы сдвига и границы двойников становятся менее четко очерченными. После 7 циклов (рисунок 1б) деформирования происходит ($\gamma \rightarrow \alpha$) – мартенситное превращение и формирование незначительной доли α -мартенсита. Увеличение степени деформации приводит к увеличению объемной доли α -мартенсита в процессе фазового превращения до 27%, но интенсивность мартенситного превращения уменьшается с увеличением деформации.

Помимо исследования изменения микроструктуры стали при деформировании, были исследованы механические свойства колец при растяжении. Как показали механические испытания на растяжение, полученная в процессе КВД, нанокристаллическая структура стали AISI 316 обладает высоким комплексом механических свойств, в отличие от исходного состояния, при котором сталь демонстрирует низкие прочностные свойства предел прочности – 595 МПа, предел текучести – 320 МПа при достаточно высоких характеристиках пластичности 55%. Видно, что формирование нанокристаллической структуры после 7 циклов деформирования методом КВД со средним размером зерен 80-100 нм приводит к росту предела текучести с 320 до 870 МПа по сравнению с исходным состоянием. Прочность увеличивается с 595 до 1590 МПа в соответствии с уменьшением размера зерен и областей когерентного рассеяния и повышением значений микродоформаций. Значение пластичности резко снижается по сравнению с исходным состоянием до 25%, однако остается на достаточном для применения уровне.

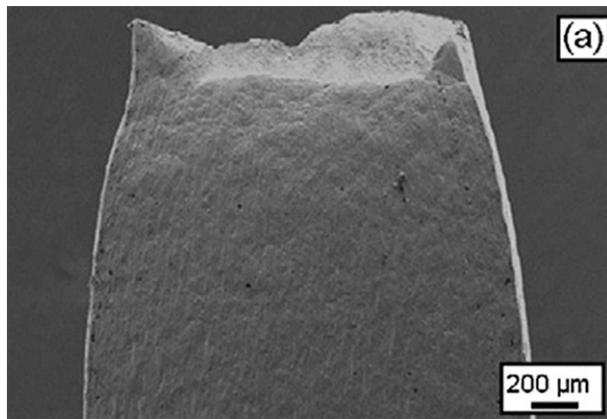
Результаты определения микротвердости коррелируют с данными механических испытаний и свидетельствуют о том, что КВД в новом штампе позволяет получить достаточно однородную твердость по всему сечению кольца. После семи проходов КВД микротвердость по сравнению с исходным состоянием возрастает примерно в 3 раза с 1080 МПа до 2680 МПа. При этом основной прирост твердости приходится на первые 4 прохода – 40%.

На рисунке 2 показаны фотографии нержавеющей стали AISI 304 после испытаний на растяжение. Полученный образец исходного состояния недеформированной стали демонстрирует особенность шейки образца, кромка сдвига сформирована вокруг поверхности разрушения, как показано на рисунке 2а. Зерна удлинены вдоль оси растяжения, что указывает на высокую пластичность при растяжении. Внутри удлинённых зерен имеются несколько полос скольжения, перпендикулярных плоскости разрушения, что является результатом деформации шейки. После 7 циклов

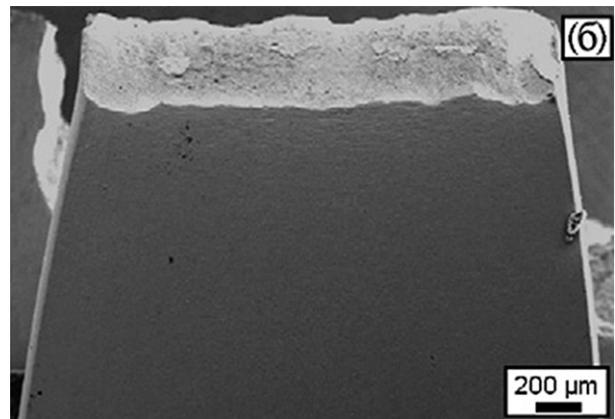


а – исходное состояние; б – 7 циклов

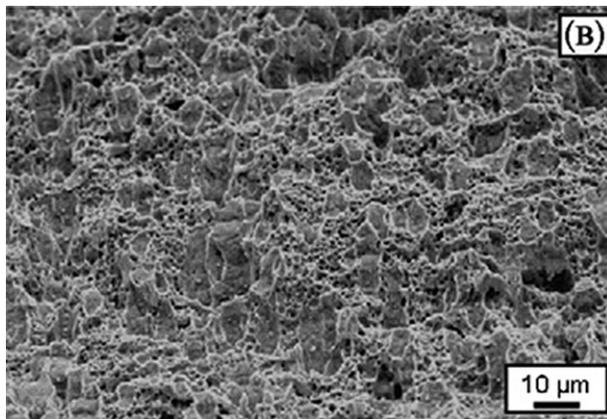
Рисунок 1 – Микроструктура стали AISI 316 в процессе кручения под высоким давлением



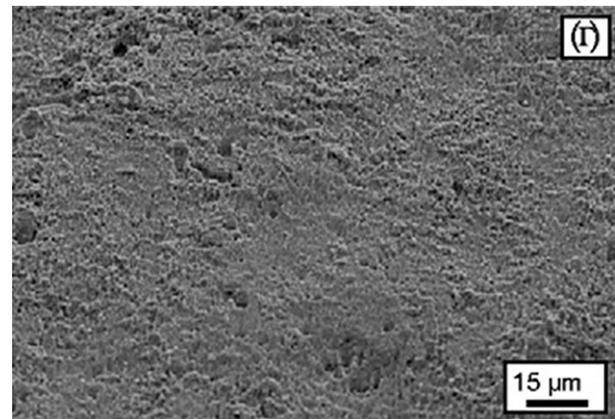
а



б



в



г

а, в – исходное состояние; б, г – 7 циклов

Рисунок 2 – Фрактография стали AISI 316 после растяжения

деформирования методом КВД в образец имеет небольшую шейку, а поверхность разрушения почти плоская (рисунок 2б).

На боковой поверхности появляются четкие полосы продольного сдвига, вызванные деформацией шейки. Это указывает на то, что образец имеет слабую шейку на боковой поверхности. При большом увеличении хорошо видно, что по-

верхность излома недеформированного образца содержит множество глубоких углублений, однородно распределенных, как соты (рисунок 2в). После 7 проходов деформирования небольшие углубления появляются только в локальных областях, и на поверхности разрушения образца, имеется множество гладких участков (рисунок 2г).

Из приведенных выше результатов можно

сделать вывод, что исходная структура недеформированной стали обладает хорошей пластичностью и проявляет типичные признаки пластичного разрушения. Но с увеличением циклов КВД механизм разрушения меняется с пластичного на хрупкий, что свидетельствует о снижении пластичности нержавеющей стали AISI 316.

Выводы

В процессе кручения под высоким давлением существенно измельчается структура образцов до наноструктурной, так сталь AISI 316 со средним размером зерна 30 мкм после деформирования

измельчилась до 80-100 нм. Значения предела прочности и предела текучести увеличиваются за семь проходов с 595 до 1590 МПа и с 320 до 870 МПа соответственно. Относительное удлинение меняется с 55 до 25%, однако остается на достаточном для применения уровне. Исходная структура недеформированной стали обладает хорошей пластичностью и проявляет типичные признаки пластичного разрушения. Но с увеличением циклов КВД механизм разрушения меняется с пластичного на хрупкий, что свидетельствует о снижении пластичности нержавеющей стали AISI 316.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08856353).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramesh Kumar S., Kondaiah Gudimetla, Tejaswi B., Ravisankar B. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg Alloy Processed by ECAP at Room Temperature and Cryo Temperature // Trans Indian Inst Met. 2017. V. 70. pp. 639-648.
2. Frint P., Wagner M.F.-X., Weber S. et al. An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys // Journal of Materials Processing Technology. 2017. V.239. pp. 222-229.
3. A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D. Yang, F. Micari, G. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski and A. Yanagida. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. V. 57. pp. 716-735.
4. A.P. Zhilyaev and T.G. Langdon. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. Progress in Materials Science. 2008. V.53, pp. 893-979.
5. M. Haddad, Y. Ivanisenko, H.-J. Fecht. Behavior of C45 steel Subjected to Different High Pressure Torsion (HPT) Procedures. International Journal of Applied Science and Technology. 2015. V. 5, pp. 144-153.
6. Zhilyaev, A.P. Evolution of microstructure and microtexture in FCC metals during high-pressure torsion / A.P. Zhilyaev, T.R. Mcnelley, T.G. Langdon // Journal of Materials Science. 2007. V. 42, No. 5. pp. 1517-1528.
7. Литовченко И.Ю., Аккузин С.А., Полехина Н.А., Тюменцев А.Н. Влияние термомеханических обработок на формирование субмикроструктурных состояний и механические свойства метастабильной аустенитной стали // Письма о материалах. 2016. № 4 (24). С. 290-293.
8. Linderov, M., et al. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy. Materials Science and Engineering: A, 2014. 597. pp. 183-193.
9. Hahnenberger, F., Smaga, M. and Eifler, D. Microstructural investigation of the fatigue behavior and phase transformation in metastable austenitic steels at ambient and lower temperatures. International Journal of Fatigue, 2014. 69. pp. 36-48.
10. Волокитин А.В., Найзабеков А.Б., Волокитина И.Е. и др. Конструкция штампа для реализации кручения под высоким давлением // Вестник КазНУ. Алматы, 2021. № 2. С. 207-214.

Жоғары қысымды бұралу процесінде AISI 316 болатының микроқұрылымы және механикалық қасиеттері

¹ВОЛОКИТИН Андрей Валерьевич, PhD, аға оқытушы, dyusha.vav@mail.ru,

²НАЙЗАБЕКОВ Абдрахман Батырбекович, т.ғ.д., профессор, naizabekov57@mail.ru,

^{2*}ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна, PhD, доцент, irinka.vav@mail.ru,

¹БОБРОВ Антон Алексеевич, магистрант, toxa.87.20@mail.ru,

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

²Рудный индустриалды институты, Қазақстан, 111500, Рудный, Қазанға 50 жыл көшесі, 38,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жаңа қалыптағы жоғары қысымды бұралу процесінің AISI 316 коррозияға төзімді болатының құрылымы мен механикалық қасиеттеріне әсері зерттелді. Деформация бөлме температурасында жүргізілді, деформация циклдарының саны – 7. Жоғары қысымды бұралу процесінде үлгілердің құрылымы на-ноқұрылымға айтарлықтай ұсақталады, сондықтан AISI 316 орташа астық мөлшері 30 мкм деформациядан кейін 80-100 нм дейін ұсақталды. Беріктік шегі мен аққыштық шегінің мәндері жеті өту кезінде тиісінше 595-тен 1590 МПа-ға дейін және 320-дан 870 МПа-ға дейін ұлғаяды. Салыстырмалы ұзарту 55-тен 25%-ға дейін өзгереді, алайда қолдану үшін жеткілікті деңгейде қалады. Деформацияланбаған болаттың бастапқы құрылымы жақсы икемділікке ие және пластикалық бұзылудың типтік белгілерін көрсетеді. Бірақ жоғары

қысымды бұралу циклдерінің жоғарылауымен сыну механизмі пластиктен сынғыштыққа ауысады, бұл AISI 316 тот баспайтын болатының икемділігінің төмендегенін көрсетеді.

Кілт сөздер: қарқынды пластикалық деформация, жоғары қысымды бұралу, микроқұрылым, болат, механикалық қасиеттері, фрактография, созылу, ультра түйіршікті құрылым, деформация, микроқаттылық.

Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316 Steel in the Process of High-pressure Torsion

¹VOLOKITIN Andrey, PhD, Senior Lecturer, dyusha.vav@mail.ru,

²NAYZABEKOV Abdrakhman, Dr. of Tech. Sci., Professor, naizabekov57@mail.ru,

^{2*}VOLOKITINA Irina, PhD, Associate Professor, irinka.vav@mail.ru,

¹BOBROV Anton, master student, toxa.87.20@mail.ru,

¹NCJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,

²Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, 111500, Rudny, 50 years of October Street, 38,

*corresponding author.

Abstract. The influence of the high-pressure torsion process in a new die on the structure and mechanical properties of corrosion-resistant AISI 316 steel was studied. Deformation was carried out at room temperature, the number of deformation cycles was 7. During high – pressure torsion, the structure of the samples is significantly crushed to nanostructured, so AISI 316 steel with an average grain size of 30 microns after deformation was crushed to 80-100 nm. The values of the ultimate strength and yield strength increase in seven passes from 595 to 1590 MPa and from 320 to 870 MPa, respectively. The elongation varies from 55 to 25%, but remains at a sufficient level for application. The initial structure of undeformed steel has good ductility and shows typical signs of plastic failure. But with an increase in the HPT cycles, the destruction mechanism changes from plastic to brittle, which indicates a decrease in the plasticity of AISI 316 stainless steel.

Keywords: intensive plastic deformation, high-pressure torsion, microstructure, steel, mechanical properties, fractography, stretching, ultra-fine-grained structure, deformation, microhardness.

REFERENCES

1. Ramesh Kumar S., Kondaiah Gudimetla, Tejaswi B., Ravisankar B. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg Alloy Processed by ECAP at Room Temperature and Cryo Temperature // Trans Indian Inst Met. 2017. V. 70. pp. 639-648.
2. Frint P., Wagner M.F.-X., Weber S. et al. An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys // Journal of Materials Processing Technology. 2017. V. 239. pp. 222-229.
3. A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D. Yang, F. Micari, G. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski and A. Yanagida. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. V. 57. pp. 716-735.
4. A.P. Zhilyaev and T.G. Langdon. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. Progress in Materials Science. 2008. V. 53, pp. 893-979.
5. M. Haddad, Y. Ivanisenko, H.-J. Fecht. Behavior of C45 steel Subjected to Different High Pressure Torsion (HPT) Procedures. International Journal of Applied Science and Technology. 2015. V. 5, pp. 144-153.
6. Zhilyaev, A.P. Evolution of microstructure and microtexture in FCC metals during high-pressure torsion / A.P. Zhilyaev, T.R. Mcnelley, T.G. Langdon // Journal of Materials Science. 2007. V. 42, No. 5. pp. 1517-1528.
7. Litovchenko I.YU., Akkuzin S.A., Polekhina N.A., Tyumencev A.N. Vliyanie termomekhanicheskikh obrabotok na formirovanie submikrokristallicheskih strukturnyh sostoyanij i mekhanicheskie svoystva metastabil'noj austenitnoj stali // Pis'ma o materialah. 2016. No. 4 (24). pp. 290-293.
8. Linderov, M., et al. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy. Materials Science and Engineering: A, 2014. 597. pp. 183-193.
9. Hahnenberger, F., Smaga, M. and Eifler, D. Microstructural investigation of the fatigue behavior and phase transformation in metastable austenitic steels at ambient and lower temperatures. International Journal of Fatigue, 2014. 69. pp. 36-48.
10. Volokitin A.V., Najzabekov A.B., Volokitina I.E. i dr. Konstrukciya shtampa dlya realizacii krucheniya pod vysokim davleniem // Vestnik KazNITU. Almaty, 2021. No. 2. pp. 207-214.