

УДК 621.785

О КИНЕТИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ ПРИ БОРИРОВАНИИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ И ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЕЙ

**И. А. Гармаева^{1, 2}, А. М. Гурьев^{1, 3}, Б. Д. Лыгденов^{2, 3},
Мэй Шунчи³, Е. А. Кошелева¹**

¹ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
г. Улан-Удэ, Россия

³ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

В работе приведены экспериментальные данные, полученные при борировании среднеуглеродистой и высокоуглеродистой сталей. Рассмотрены полученные диффузионные боридные слои. На основе металлографических исследований и анализа литературных источников изучена кинетика формирования боридного слоя на сталях с разным содержанием углерода. Известно, что на структуру боридного покрытия влияет фазовый состав стали, а также ряд других факторов (активность насыщающей среды, способ борирования, температура процесса). Показано, что механизм формирования диффузионных боридных слоев не зависит от содержания углерода в стали, но кинетика диффузионных процессов существенно изменяется. При выборе марки стали для борирования необходимо учитывать условия эксплуатации детали в механизме, для назначения окончательной термической обработки. При высокой концентрации углерода в приповерхностных областях рост зародыша боридов сопровождается оттеснением углерода в глубь металла. В зависимости от температуры борирования углерод либо успевает продиффундировать (а), либо скапливается между зубьями боридов и в их основании (б), образуя фазу, которую интерпретировали как борный цементит $Fe_3(B,C)$. В случае (а) при охлаждении под боридным слоем формируется перлитная структура, в случае (б) - борный цементит и перлит в соотношении, которое определяется концентрацией углерода, вытесненного бором. В результате получается сложная структура поверхностного слоя, состоящая из разных фаз. Таким образом боридные слои, полученные в различных условиях, не являются однородными в структурном отношении и могут иметь более или менее выраженное сложное зубчатое строение. Очевидно, что в проблеме борирования много нерешенных вопросов, которые заслуживают глубокого исследования.

Ключевые слова: сталь, упрочнение, борирование, диффузионный слой

ABOUT A KINETICS OF FORMATION OF A DIFFUSION LAYER WHEN BORATING MEDIUM-CARBON AND HIGH-CARBON STEELS

**A. I. Garmaeva^{1, 2}, A. M. Guriev^{1, 3}, B. D. Lygdenov^{2, 3},
Mei Shunqi³, E. A. Kosheleva¹**

¹ Altai State Technical University, Barnaul, Russia

² East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

³ Wuhan Textile University, Wuhan, China

The paper presents experimental data obtained in boriding medium carbon and high carbon steels. The obtained diffusion of the boride layers. Based on metallographic studies and analysis of the literature substantiated the kinetics of formation of boride layer. On the structure of the boride coating is affected by the phase composition of the steel, as well as a number of other factors (activity of the saturating environment, the method of boriding temperature process). The formation of diffusion boride layers depends on the carbon content, but the kinetics of the diffusion process significantly changes. When choosing a steel grade for boriding need to consider the parts in the

И. А. ГАРМАЕВА, А. М. ГУРЬЕВ, Б. Д. ЛЫГДЕНОВ, МЭЙ ШУНЧИ, Е. А. КОШЕЛЕВА

mechanism for assigning the final heat treatment. At high concentrations of carbon in the surface areas of the growth of the embryo boride is accompanied by the deformation of the carbon into the metal. Depending on the temperature of the boriding carbon a) either manages to prodifferentiating, or b) accumulates between the teeth of the borides and their base, forming a phase, which the authors interpreted as boron cementite $\text{Fe}_3(\text{B}, \text{C})$. In case (a) when it is cooled under the boride layer is formed in a pearlite structure, in the case of (b) - boron cementite and pearlite in a ratio which is determined by the concentration of carbon displaced by the Bor. So, the result is a complex surface layer structure consisting of different phases. Thus, as follows from the literature data, the boride layers obtained in various conditions are not homogeneous in structural terms and can have more or less expressed complex toothed structure. It is obvious that the problem of borating are many unresolved issues that deserve in-depth study.

Ключевые слова: steel, hardening, diffusion layer

Введение

Атомы бора благодаря своим размерам и стремлению к ковалентной связи при вхождении в металлические сплавы занимают особое положение среди легирующих компонентов в стали. Проблема твердых растворов бора в α -фазе широко дискутируется в литературе [1]. С использованием экспериментальных данных по изменению параметра решетки при введении бора в α -Fe, параметров диффузии бора в α -Fe и данных о внутреннем трении значительная часть исследователей полагает, что бор образует в α -Fe твердый раствор замещения, т.е. растворяется по вакансиям. Здесь также есть проблемы. Первое правило Юм-Розери на ограничение непрерывной растворимости по замещению гласит:

$$\frac{\Delta R}{R_{\text{Fe}}} = \frac{R_{\text{Fe}} - R_{\text{B}}}{R_{\text{Fe}}} < 0,15 \quad (2.9).$$

Величина $\Delta R / R_{\text{Fe}}$ называется размерным фактором и для бора с железом она равна 0,27, что значительно повышает предел Юм-Розери. Другие факторы, как-то кристаллическая решетка бора, его электронное строение, стремление к ковалентным связям также не благоприятствуют растворимости бора в α -Fe. Поэтому растворимость бора в α -Fe очень мала. Вакансия в α -Fe слишком велика для размещения в нем атома бора. При этом как в γ -, так и в α -Fe бор создает значительные искажения твердого раствора, которые быстро разрушают кристаллическую решетку железа. Поэтому введение бора в жидкое железо при быстром охлаждении способствует его аморфизации [1 – 3, 15 – 17].

Ввиду малой растворимости бора в кристаллической решетке железа из специфического соотношения радиусов атомов бора и железа бор эффективно взаимодействует с дефектами решетки, в особенности с границами зерен, с субграницами и дислокациями. Так, в частности, энергия взаимодействия бора с границей зерна в α -Fe очень велика (~1 эВ/атом) [4, 12].

Известно, что диффузионное борирование является одним из эффективных методов улучшения физико-механических свойств поверхностного слоя стали. Но, высокая твердость боридных покрытий ограничивает номенклатуру деталей машин и механизмов, работающих в условиях динамических нагрузок. В связи с этим является актуальным снижение хрупкости и повышение прочности диффузионного боридного слоя. К решению проблемы можно подойти по-разному.

Во-первых, за счет добавления в насыщающую смесь компонентов, формирующие интерметаллидные соединения в стали (Ni, Cu и др.), во-вторых, подбором химического состава стали. И обязательная окончательная термическая обработка после химико-термической обработки. В любом случае выбор способа упрочнения зависит от конкретных условий работы определенной детали.

Исследования, проведенные в данной работе, позволят расширить представления о кинетике формирования диффузионных боридных покрытий, приведет к дальнейшей систематизации базы данных по химико-термической обработке (ХТО).

Методы и материалы

Диффузионному упрочнению подвергали средние и высокоуглеродистые стали (сталь 45 и У8). Насыщающая смесь состояла из порошков с фракцией: B_4C – 180 мкм; Al_2O_3 – 60 мкм; NaF – 60 мкм; В – 3 мкм; Cr – 100 мкм; Ti – 100 мкм.

Образцы помещали в жаростойкие контейнеры и засыпали порошковыми смесями так, чтобы расстояние от дна контейнера до нижнего слоя образцов было не менее 10 мм, между образцами – не менее 5 мм, от верхнего слоя образцов до верха засыпки – не менее 15 мм. Для предотвращения доступа кислорода порошковую смесь изолировали плавким затвором (40 % буры + 60 % SiC) толщиной 5 – 6 мм. Упакованные таким образом контейнеры помещали в предварительно нагретую до температуры 950 °С печь. Вы-

О КИНЕТИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ПРИ БОРИРОВАНИИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ И ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЕЙ

держку при температуре насыщения в течение 2,5 ч (150 минут). После выдержки контейнеры извлекали из печи и охлаждали на воздухе до температуры 70 – 80 °С. После чего распаковывали и извлекали образцы. Извлечённые образцы промывали в мыльной воде и просушивали.

Результаты и обсуждение

В результате диффузионного насыщения получены слои с типичными «боридными иглами», в строгом соответствии с положением о том, чем больше углерода, тем меньше толщина боридного слоя. Морфология и фазовый состав боридных покрытий соответствует иерархии, описанной в монографии [8].



Рисунок 1 – Диффузионный боридный слой на стали 45, толщина слоя около 40 мкм, х 100 (метод контраста – светлое поле); состав: 80 % B_4C + 2 % NaF + 18 % Al_2O_3



Рисунок 2 – Диффузионный боридный слой на стали У8, толщина слоя около 20 мкм, х 100 (метод контраста – светлое поле); состав: 80 % B_4C + 2 % NaF + 18 % Al_2O_3

Малая растворимость бора в железе влечет за собой интенсивное образование

вторичных фаз этих элементов, даже при малой концентрации бора. Бориды Fe_2B и FeB образуются путем реакционной диффузии вслед за межфазной границей, которая смещается в глубь альфа-Fe.

Содержание углерода в стали, в значительной степени, влияет на кинетику формирования диффузионного боридного слоя. Это связано с тем, что диффузия при борировании проходит в фазовом состоянии вблизи от температуры плавления. В то же время оплавления ни одной из фаз не достигается. Температура борирования (970 – 990 °С) гораздо ниже температуры плавления эвтектики Fe- Fe_2B и Fe- Fe_3C . Следовательно, возникают неоднородные по концентрации кристаллические аморфные фазы, которые ускоряют диффузионные процессы при борировании.

Стали с большим содержанием углерода термодинамически менее предрасположены к возникновению аморфных фаз. Учитывая, что аморфные фазы ускоряют диффузионные процессы (энергия активации диффузии в аморфных прослойках не более 1/2 от энергии активации в кристаллической фазе), очевидно, что глубина проникновения бора в сталь с большим содержанием углерода будет меньше.

Аморфная фаза метастабильна, и медленное охлаждение после диффузионного насыщения приводит к формированию диаграммных фаз.

Заключение

Механизм формирования диффузионных боридных слоев не зависит от содержания углерода в стали, но кинетика диффузионных процессов существенно изменяется.

Список литературы

1. Судзуки К., Фудзимори Х., Хакимото К. Аморфные материалы. М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
2. Ковнеристый Ю.К., Осипов Э.К., Трофимова Е.А. Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов. М.: Наука, 1983. – 145 с.
3. Гаскел Ф. Модели структуры аморфных металлов. // Металлические стекла. Выпуск II. Атомная структура и динамика, электронная структура, магнитные свойства. М.: Мир, 1968. - С.12-63.
4. Гринберг Е.М. Металловедение борсодержащих конструкционных сталей. М.: МИСИС, 1997. – 198 с.
5. Бутуханов В.А., Цыдыпов Б.С., Лыгденов Б.Д., Мэй Ш. Формирование фазового состава при диффузионном насыщении в порошковой смеси, содержащей ферросплавы. // Международный журнал экспериментального образования. - 2016. - № 8-0. - С. 75-76.

И. А. ГАРМАЕВА, А. М. ГУРЬЕВ, Б. Д. ЛЫГДЕНОВ, МЭЙ ШУНЧИ, Е. А. КОШЕЛЕВА

6. Бутуханов В.А., Цыдыпов Б.С., Мэй Ш., Лыгденов Б.Д. Оптимизация состава для получения карбидных диффузионных слоев с максимальной износостойкостью. // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Горохов А.А. - 2016. - С. 32-35.
7. Lygdenov B.D., Butukhanov V.A., Mei Sh., Chernykh E.V., Garmaeva I.A. Formation of the diffusion layer processing concentrated energy sources surface active mixtures deposited on the steel surface. // « Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys Book of the International seminar articles». Edition in Chief: Professor Sc. D., Starostenkov M.D. - 2015. - С. 59.
8. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Мосоров В.И., Бутуханов В.А. Перспективные диффузионные покрытия. Raleigh, North Carolina, USA, 2015. - 131 p.
9. Бутуханов В.А., Лыгденов Б.Д. Влияние состава насыщающих порошковых сред на структуру и свойства диффузионных карбидных слоев. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2016. - № 2 (71). - С. 80-86.
10. Бутуханов В.А., Лыгденов Б.Д. Борирование в обмазке стали 5ХНМ. // «Современные инновации в науке и технике». Сборник материалов II-ой Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор: Горохов А.А. - 2012. - С. 44-47.
11. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Лыгденов Б.Д. Способ упрочнения стальных деталей. Патент на изобретение RU 2381299 12.05.2008.
12. Гурьев, А.М. Термоциклическое борирование как метод повышения прочности инструментальных сталей / Гурьев А.М., Власова О.А., Лыгденов Б.Д., Гармаева И.А., Кириенко А.М., Иванов С.Г., Кошелева Е.А. // Ползуновский альманах. - 2007. - № 1-2. - С. 85.
13. Лыгденов Б.Д., Гармаева И.А., Попова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 и 5ХНВ. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2012. - Т. 9. - № 4-2. - С. 681-689.
14. Лыгденов Б.Д. Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ГОУВПО "Алтайский государственный технический университет". Барнаул, 2009. - 355 с.
15. Гурьев, М. А. Перспективные методы получения упрочняющих покрытий / Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Галаа О. - Барнаул, 2016. - 182 с.
16. Бутуханов В.А., Суханов Н.Г., Лыгденов Б.Д., Галаа О. Диффузионное упрочнение сталей в насыщающей среде V+AL+V 4C. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2013. - Т. 10. - № 1. - С. 146-148.
17. Лыгденов Б.Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой. Дисс. на соиск. ученой степени кандидата технических наук / Новокузнецк, 2004. - 226 с.
18. Гармаева И.А., Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Власова О.А. Исследование влияния различных факторов при борировании на механические свойства стали с применением математической модели. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 10. - С. 30-32.
19. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Гармаева И.А. Влияние режимов борирования на упрочнение поверхности уплотнительного кольца из стали 40ХН2МА. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2007. - Т. 4. - № 2. - С. 90-93.
20. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Гурьев М.А., Шунчи М., Власова О.А. Борирование малоуглеродистой стали. - Raleigh, 2015. - 141 p.
21. Мосоров В.И., Грешилов А.Д., Лыгденов Б.Д. Исследование фазового состава и дислокационной структуры борированной стали 55Л. // Ползуновский вестник. - 2012. - № 1-1. - С. 206-208.
22. Корнопольцев В.Н., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д. Разработка технологии борирования в порошковой среде, содержащей борную кислоту. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2011. - № 2. - С. 40-42.
23. Гармаева И.А., Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. Структура и свойства инструментальной стали 5ХНВ после борирования. // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 197-198.
24. Lygdenov B.D., Guriev A.M., Butukhanov V.A., Mei Sh., Zhou Q. Phase composition of gradient structures on carbon steels after boronizing. «External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys». Book of the International seminar articles. Ed. by V. Gromov. - 2014. - С. 154-160.
25. Mei Shunqi, Lygdenov B., Huang J, Zheng W.L., Dong Y.J., Liu C., Butukhanov V. The microstructure and properties of the coating with vanadium borides on carbon steel by use of electron beam in vacuum treatment/ Proceeding of the 4th 2016 International Conference on Material Science and Engineering (ICMSE 2016). AER Advances Engineering Research. - T.101. - 302-307 с.
26. Mei Shunqi, Dong Y.J., A.M. Guriev, Zheng W.L., Chao Liu., S.G. Ivanov, M.A. Guriev, T.G. Ivanova, E.V. Chernykh. Morphology and Wear Resistance of Multicomponent Diffusion Coatings/ Proceeding of the 4th 2016 International Conference on Material Science and Engineering (ICMSE 2016). AER Advances Engineering Research. - T.101. - 308-313 с.
27. Гурьев, А. М. Диффузионное упрочнение поверхности сталей бором совместно с хромом, вольфрамом и титаном / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, М. А. Гурьев, И. А. Гармаева, Мэй Шунчи, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. - 2016. - № 4. - С. 23-28.
28. Гурьев, А. М. Исследование фракционного состава насыщающих смесей для химико-термической обработки сталей / А. М. Гурьев, С. А.

О КИНЕТИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ПРИ БОРИРОВАНИИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ И ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЕЙ

Иванова, Е. А. Кошелева, Мэй Шунчи // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 63-66.

29. Гармаева, И. А. Одновременное насыщение бором, хромом и титаном углеродистых и легированных сталей / И. А. Гармаева, А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева, Мэй Шунчи // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 117-121.

30. Гурьев, М. А. Разработка нового способа поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента / М. А. Гурьев, С. Г. Иванов, Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 153-156.

31. Гармаева, И. А. Микротвердость покрытий на стали 45, полученных борированием и одновременным насыщением бором, хромом и титаном / И. А. Гармаева, Т. Г. Иванова, Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 165-168.

32. Кошелева, Е. А. Повышение прочности инструментальных сталей / Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – 2015. – № 2. – С. 133-134.

33. Иванов, С. Г. Формирование диффузионного покрытия на титане из смеси на основе карбида бора / С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, Т. Г. Иванова, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – 2015. – № 2. – С. 165-168.

34. Гурьев, М. А. Поверхностное легирование деталей в процессе их производства методом литья по газифицируемым моделям / М. А. Гурьев, С. Г. Иванов, Е. В. Черных, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – 2015. – № 2. – С. 173-175.

35. Гурьев, М. А. Технология нанесения многокомпонентных упрочняющих покрытий на стальные детали / М. А. Гурьев, Д. С. Фильчаков, И. А. Гармаева, С. Г. Иванов, М. Гурьев, Г. А. Околович // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1-1. – С. 73-78.

36. Лыгденов, Б. Д. Диффузионное борирование быстрорежущей стали р18 / Б. Д. Лыгденов, А. Д. Грешилов, А. Ц. Мижитов, М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: межвуз. сб. под ред. В. А. Вагнера; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – Вып. 7 (ч. 1). – С. 40 – 44.

37. Гурьев, М. А. Оптимизация состава многокомпонентной насыщающей смеси на основе бора и хрома для поверхностного легирования сталей / М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 131-135.

38. Гурьев, А. М. Термоциклическое борирование как метод повышения прочности инструментальных сталей / А. М. Гурьев, О. А. Власова, Б. Д. Лыгденов, И. А. Гармаева, А. М. Кириенко, С. Г. Иванов, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – 2007. – № 1-2. – С. 85-88.

39. Кошелева, Е. А. Разработка методов микро-термоциклической обработки деталей машин и инструмента / Е. А. Кошелева, О. А. Власова, Е. А. Нестеренко, А. М. Гурьев // XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. – Т. 2. –

Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 92-93.

40. Иванов, С. Г. Диффузионное хромирование сталей из насыщающей обматки / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, С. А. Земляков, Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. – 2006. – № 3. – С. 191.

41. Кошелева, Е. А. Разработка способа термоциклического борохромирования деталей машин и инструмента / Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, О. А. Власова, М. А. Гурьев, Т. Г. Другова, А. М. Гурьев // IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2007», Барнаул: – Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 45-48.

42. Кошелева, Е. А. Эффективность комплексного насыщения сталей бором и хромом – борохромирования / Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов, Е. А. Нестеренко // VI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2009», Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 105-106.

43. Кошелева, Е. А. Перспективные методы получения упрочняющих покрытий / Е. А. Кошелева // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 195-197.

44. Иванов, С. Г. Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, О. А. Власова, М. А. Гурьев // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ – 2008. – № 4 – С. 53-54.

45. Кошелева, Е. А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном упрочнении инструментальных сталей / Е. А. Кошелева, Е. А. Нестеренко, А. Г. Иванов, А. М. Гурьев // Труды VI Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 179-183.

46. Гурьев, А. М. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, С. Г. Иванов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, И. А. Гармаева, М. А. Гурьев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Т. 4. – № 1. – С. 30-35.

Гармаева Ирина Анатольевна^{1,2} – к. т. н., доцент
Гурьев Алексей Михайлович^{1,3} – д. т. н., профессор

Лыгденов Бурьял Дондокович^{2,3} – д. т. н., профессор

Мэй Шунчи³ – профессор

Кошелева Елена Алексеевна¹ – к. т. н., доцент

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия

² ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ВСГУТУ), г. Улан-Удэ, Россия

³ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай