

УДК 621.77.07

doi:10.18720/SPBPU/2/id-161

П.А. Кузнецов<sup>1</sup>, К.В. Лепетан<sup>2</sup>, А.О. Просторова<sup>3</sup>, В.П. Третьяков<sup>4</sup>,  
В.Г. Теплухин<sup>5</sup>

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ ПРИ ЭЛАСТОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ



<sup>1</sup>Павел Алексеевич Кузнецов,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9530, E-mail: pa-kuznetsov@yandex.ru



<sup>2</sup>Кирилл Владимирович Лепетан,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9530, E-mail: lepetan\_k@mail.ru



<sup>3</sup>Александра Олеговна Просторова,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9530, E-mail: prostorova\_ao@spbstu.ru



<sup>4</sup>Валерий Павлович Третьяков,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого, Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9302, E-mail: tretyakov\_vp@spbstu.ru



<sup>5</sup>Василий Гельевич Теплухин,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9302, E-mail: v.teplukhin@onti.spbstu.ru

### Аннотация

В работе обоснована перспективность применения двухкомпонентных литьевых полиуретанов для получения изделий из металлических порошков

эластостатическим прессованием (ЭСП). Приведены результаты применения двухкомпонентного литьевого полиуретана Силагерм 6070П для получения порошковых деталей типа "конус". Формообразующие элементы оснастки для литья эластичной пресс-формы изготавливались с помощью 3D-печати. Представлены принципиальные схемы и эскизы пресс-форм для эластостатического прессования типовых изделий из порошков – шаров и ступенчатых втулок.

*Ключевые слова:* эластомер, полиуретан, прессование, металлический порошок

## **Введение**

Полиуретаны (синтетические эластомеры) нашли широкое применение в промышленности благодаря широкому диапазону свойств, в том числе прочностных характеристик. Механические свойства полиуретанов изменяются в очень широких пределах и зависят от природы и длины участков цепи между уретановыми группами, структуры цепей (линейная или сетчатая), молекулярной массы и степени кристалличности.

Для получения полиуретана применяется сложное высокотехнологичное оборудование и специальные технологии, позволяющие получить сырье с определенными характеристиками [1-4]. Материал может иметь и разную форму – вспененный, жидкий, напыляемый. В качестве конструкционного материала наиболее востребован твердый полиуретан – листовый, в виде стержней или пластин.

Двухкомпонентный полиуретан получают смешиванием двух компонентов. В качестве первого компонента используются различные изоцианатные соединения, в качестве второго – соединения, содержащие гидроксильные группы [2]. При смешивании компонентов происходит полимеризация. Горячая полимеризация осуществляется в условиях высоких температур, холодная – в условиях обычной температуры окружающей среды. Наиболее технологичен для изготовления деталей из полиуретана метод литья, при котором не требуются большие усилия и высоко технологичное оборудование.

Особо следует выделить литьевые полиуретаны, полимеризация которых проходит при комнатной температуре. К таким полиуретанам относится литьевого двухкомпонентный полиуретан Силагерм 6070П, предназначенный для изготовления эластичных форм под бетонное, гипсовое литье; изготовления высокопрочных и износостойких изделий, работающих в условиях воздействия агрессивных сред. Вакуумная дегазация не обязательна. Физико-механические свойства полиуретана Силагерм 6070П представлены в таблице 1 [2]. Физические и химические свойства двухкомпонентного полиуретана обеспечивают его применение

при интенсивных нагрузках, характерных для обработки материалов давлением — листовой штамповке, прессовании порошков и др.

**Таблица 1.** Физико-механические свойства полиуретана марки Силагерм 6070П

Физико-механические свойства	Значение
Твёрдость по Шору А, усл.ед	68-75
Допустимая температура эксплуатации, °С	-20 – +60
Кратковременное повышение температуры, до °С	+80
Относительное удлинение при разрыве, % не менее	550-750
Относительная остаточная деформация, % не более	8-12
Удельный вес (плотность), г/см <sup>3</sup>	1,04
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	8,0-15,0
Усадка при полимеризации, % менее	0,1

При прессовании порошков [5] к полиуретановым материалам предъявляются особые требования, а именно: высокая стойкость к истиранию, высокие показатели твердости, высокая прочность на разрыв, требуемая для реализации значительной деформации, особенно при прессовании порошков с малой насыпной плотностью и с большим коэффициентом уплотнения; восстановление исходной формы и геометрических размеров после снятия деформации, необходимое для получения точных заготовок и др.

Благодаря уникальным характеристикам полиуретанов, сочетающим высокую эластичность со значительной твердостью, применение литевых материалов перспективно для прессования самых различных изделий из порошков эластичными средами, то есть эластостатическим прессованием (ЭСП) [6-8].

На рисунке 1 представлены принципиальные схемы типовых пресс-форм для эластостатического прессования порошков в простых или составных формах. На рис. 1,а показано ЭСП в простых эластичных матрицах, которое осуществляют следующим образом [9]. Эластичные матрицы 4 и 5 помещают в контейнер 2 на опору 6. Внутреннюю полость в эластичных полуматрицах заполняют порошком 3.

Усилие пресса Р через верхний пуансон 1 передается на эластичные матрицы 4 и 5, которые создают квазиизостатическое давление в порошке 3,

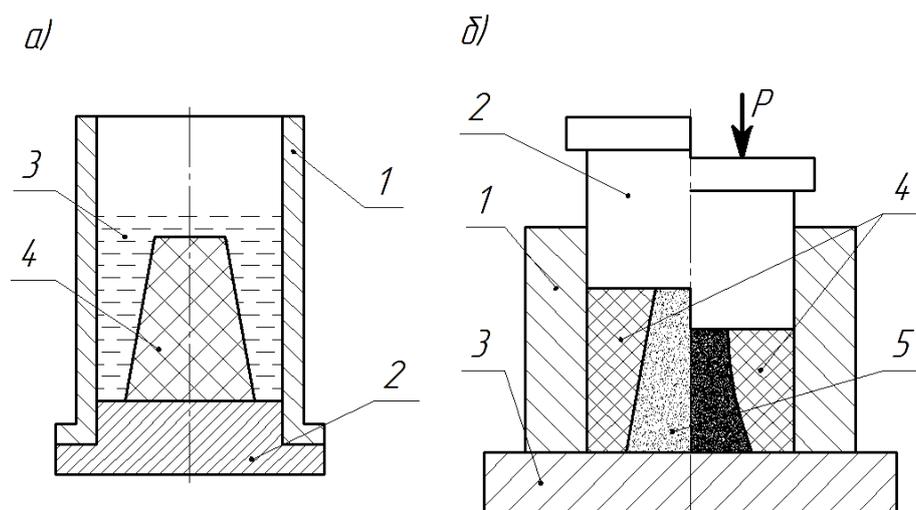


эффективность использования технологии ЭСП в мелкосерийном и даже в опытно-производстве.

## Методы

Технология изготовления эластичных матриц из двухкомпонентного полиуретана включает в себя операции: подготовка оснастки для заливки (покрытия контактирующих поверхностей восковым разделителем), изготовления двухкомпонентной смеси, заливка полученной смеси в подготовленную оснастку, полимеризация в течение 6-12 часов при комнатной температуре. После завершения полимеризации полиуретановую матрицу извлекают из оснастки.

На рисунке 2,а показана принципиальная схема оснастки для отливки эластичных полуматриц из литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П, а на рисунке 2,б – принципиальная схема пресс-формы для ЭСП образцов «конус». Процесс прессования осуществляют следующим образом (рис.2, б).



**Рис. 2.** Принципиальные схемы: а) оснастки для отливки эластичных полуматриц из литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П : 1 – жёсткий контейнер для заливки, 2 – основание, 3 – двухкомпонентный полиуретан, 4 – «напечатанная» конусовидная оправка; б) принципиальная схема пресс-формы для ЭСП образцов «конус»: 1– контейнер, 2 – пуансон, 3 опора, 4 – эластичная матрица, 5 – порошок.

Жесткий контейнер 1 устанавливают на жесткую опору 3. В полость контейнера на опору устанавливают эластичную матрицу 4. Полость между внутренней поверхностью эластичной матрицы 4 и внутренней поверхностью жесткой опоры 3 является камерой засыпки порошка для прессуемого изделия. Порошок 5 засыпается в указанную полость, рабочий объём контейнера замыкается верхним пуансоном 2, который вводится в отверстие жесткого контейнера 1. Оснастку устанавливают на стол

гидравлического пресса и с заданным усилием  $P$  осуществляют прессование образца.

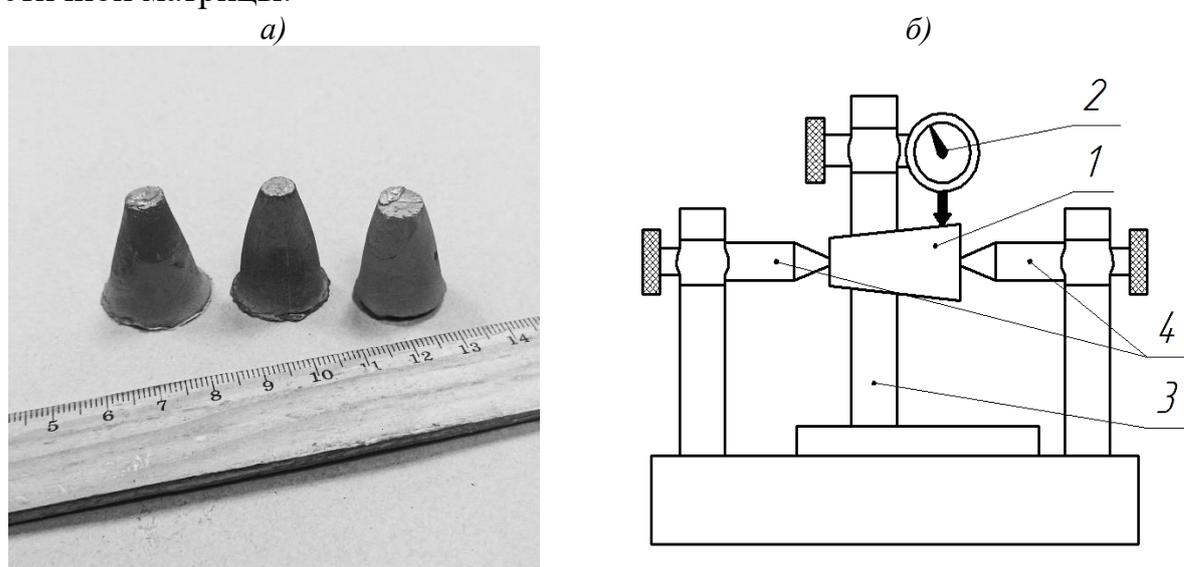
Низкая трудоёмкость изготовления формующих эластичных элементов обеспечивает возможность применения технологии порошковой металлургии не только в серийном, но также в мелкосерийном и опытном производстве. Оснастка для литья эластичных элементов достаточна проста в изготовлении и использовании.

Целью исследования являлся анализ технологических возможностей использования литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П для прессования металлического порошка марки АНС 100.29.

## Результаты

Образцы, полученные прессованием в эластичной матрице, показаны на рисунке 3,а. Исследование подтвердило возможность эффективного использования литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П при прессовании порошков. Ожидаемая стойкость эластичных матриц лежит в пределах тысяч штук.

Детали в виде усеченного конуса являются характерной деталью, которую трудно получить в жесткой пресс-форме, но можно получить прессованием в эластичной среде. При ЭСП изделий из порошков важной задачей является расчет геометрических размеров проектируемой эластичной матрицы.

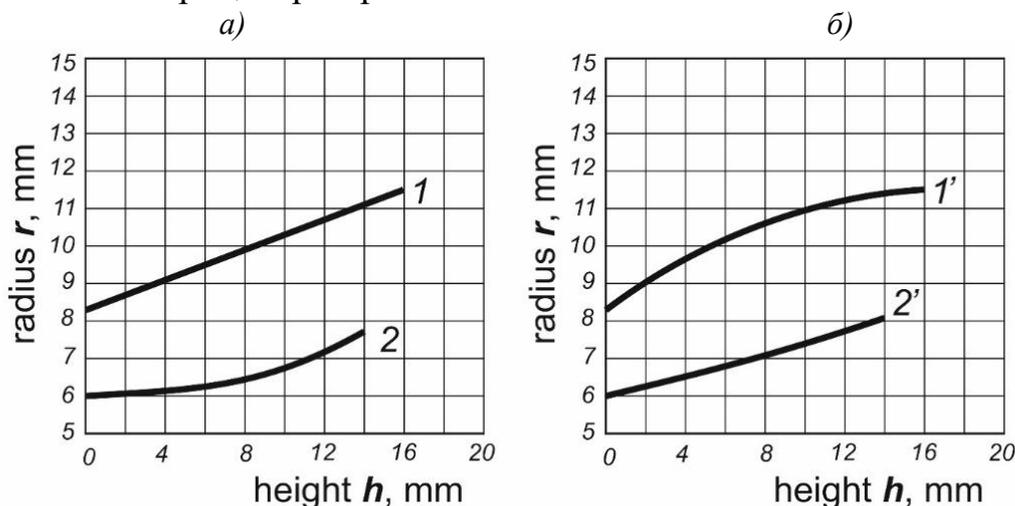


**Рис. 3.** а) образцы типа «конус», полученные методом ЭСП; б) принципиальная схема измерения размеров спрессованного образца «конус»; 1 – спрессованный образец, 2 – индикатор, 3 – стойка для индикатора, 4 – конусные центры.

Учесть все особенности и параметры процесса даже при моделировании деформации полиуретана и одновременного уплотнения

порошка затруднительно [10-12]. В ряде случаев приемлемого результата можно добиться экспериментальным путем. Методика корректировки размеров полиуретановой матрицы показана на образце типа «конус». На рис. 3,б показана принципиальная схема измерения размеров спрессованного образца «конус». Форма спрессованного образца практически повторяет форму внутренней поверхности эластичной матрицы в момент окончания процесса прессования. Следовательно, измеряя форму и размеры спрессованного образца, можно анализировать поведение эластичного материала при его деформации.

На рисунке 4 показаны графические результаты измерения образцов «конус», полученных прессованием в эластичной матрице. Линия 1 – образующая внутренней поверхности эластичной матрицы в начальном ненагруженном состоянии, линия 2 – образующая линия внутренней поверхности матрицы при прессовании.



**Рис. 4.** Графические результаты измерения образцов «конус», полученных прессованием: а – в предварительной эластичной форме; б – в скорректированной эластичной форме.

На рис. 4,а видно, что если в предварительной эластичной матрице образующая линия прямая, то при прессовании внутренняя поверхность искажается, а форма прессовки получается с вогнутой боковой поверхностью. Результаты измерений позволяют оценить величину вогнутости и внести коррективы в эластичную матрицу либо проточив её, либо изготовив новую.

На рис. 4,б представлены измерения, проведенные после прессования порошка в скорректированной матрице. В этом случае внутренняя поверхность эластичной матрицы вогнутая. Путем последовательных приближений нетрудно добиться, чтобы конус на спрессованном образце стал прямым. Следовательно, использование литьевых полиуретанов

позволит получать более точные детали и снизить трудоёмкость их изготовления.

### **Обсуждение**

Эластостатическое прессование точных профилированных заготовок и деталей из порошков несомненно расширится при использовании литьевых полиуретанов [13-15]. Этому будет способствовать улучшение технологичности метода, в том числе быстрое изготовление опытных пресс-форм. Важным моментом является появление новых недорогих полиуретановых материалов, обладающих характеристиками, востребованными именно для прессования порошков, например, низкой относительной остаточной деформацией после снятия нагрузки. Кроме того, следует отметить, что достоинством технологии является возможность получения элементов с различными технологическими свойствами, в том числе различной твёрдости по Шору. Например, в составной оснастке твердость различных эластичных элементов может варьироваться от 85-90 ед. до 60-65 ед. по Шору А, что может использоваться для управления процессом уплотнения порошка.

### **Заключение**

- Анализ технической и патентной литературы показывает, что использование полиуретанов в качестве формообразующей среды при прессовании порошковых материалов является высокоэффективным и экономически целесообразным методом;
- Уникальные физико-механические характеристики полиуретанов обеспечивают высокую стойкость пресс-форм, достаточную точность и низкую шероховатость поверхности получаемых прессовок, которые могут быть использованы как точные профилированные заготовки и детали;
- Исследованный вариант гибкой технологии, включающий изготовление оснастки для отливки на фотопринтере, подготовку двухкомпонентной смеси требуемого состава, заливку смеси в оснастку и её полимеризацию при комнатной температуре, подтвердил возможность применения такой технологии как в мелкосерийном, так и опытном производстве;
- Метод литья двухкомпонентных полиуретанов позволяет изготавливать эластичные элементы оснастки для прессования порошков самой сложной конфигурации и больших размеров, что существенно расширяет номенклатуру прессуемых изделий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Райт П., Камминг А. Полиуретановые эластомеры. «Химия». Ленинград. 1973. 340 с.
- [2] Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. М.: Додэка-XXI. 2004. 320 с.
- [3] Круль Л.П. Об агрегатных состояниях полимеров. Полимерные материалы и технологии. 2022. 8(4). С. 5.
- [4] Попович А.А. Перспективные материалы и технологии аддитивного производства. Т.1. Новые материалы для аддитивных технологий. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2023. – 346 с.
- [5] Цзычжао Х., Алишин Т.Р. Изучение деформации металлических порошков в процессе квазиизостатического прессования. Перспективы развития фундаментальных наук (Томск). 2022. 1. С. 203-205.
- [6] Deli, L. The quasi-isostatic pressing method of ceramic products. Shandong Ceramics. 2003. 26(004). pp. 24-28.
- [7] Timokhova, M. Industrial technology for the automated production of grinding balls by quasi-isostatic pressing. Refractories and Industrial Ceramics. 2011. 52(6). pp. 389-392.
- [8] Timokhova, M. Some features of the method of quasi-isostatic pressing of ceramic and refractory products. New Refract. 2019. 3. pp. 17-20.
- [9] Кузнецов П.А., Просторова А.О., Радкевич М.М. Устройство для прессования трубчатых ступенчатых изделий из порошков. Патент РФ RU 217620 U1. 2023. 10. Бюллетень ФСИС.
- [10] Jonsen, P., Haggblad, H., Gustafsson, G. Modelling the non-linear elastic behavior and fracture of metal powder compacts. Powder Technology. 284. 2015. pp. 496-503.
- [11] Lezhnev, A., Naizabekov, A., Volokitin, A., Volokitina, I., Panin, E., Knapinski, M. Development and research of combined process of equal channel angular pressing – drawing. J. Chem. Technol. Metall. 2017. 52. pp. 172-179.
- [12] Lipin, V.A., Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Karzina, Yu.S. Junction Adhesion Strength in a Layer of Aluminum-Carbon-Fiber Composite Material. Fibre Chemistry. 2024. 56. pp. 72-75.
- [13] Vinokurova, A.A., Poletaev, A.P., Kotov, S.A., Parshikov, R.A., Ganin, S.V. Investigation of Pressing and Sintering Processes of Powder Copper Samples for Equal Channel Angular Pressing. Key Engineering Materials. 2023. 941. pp. 129-134.
- [14] Kuznetsov, P., Kuznetsov, R., Lepetan, K. Development Prospects of Dies and Equipment for Elastostatic Pressing of Products from Powders. 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 200-206.

- [15] Kuznetsov, P., Prostorova, A., Kuznetsov R., Tretyakov, V. Technology of Bimetallic Products Forming Based on Sintered Inserts. 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 180-186.

P.A. Kuznetsov, K.V. Lepetan, A.O. Prostorova, V.P. Tretyakov,  
V.G. Teplukhin<sup>1</sup>

## **BEHAVIOR OF TWO-COMPONENT POLYURETHANES IN THE ELASTOSTATIC PRESSING OF METAL POWDERS**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

### **Abstract**

We discuss the prospects of using two-component injection-molded polyurethanes to produce products from metal powders by elastostatic pressing (ESP). The results of the application of two-component injection molded polyurethane Silaherm 6070P for the production of powder parts of the "cone" type are presented. The forming elements of the tooling for casting an elastic mold were made using 3D printing. Schematic diagrams and sketches of molds for elastostatic pressing of typical products made of powder balls and stepped bushings are developed.

*Key words:* elastomer, polyurethane, pressing, metal powder

### **REFERENCES**

- [1] Rait, P., Kamming, A. Polyurethane elastomers. "Chemistry". Leningrad. 1973. 340 p. (rus.)
- [2] Bolton, W. Structural materials: metals, alloys, polymers, ceramics, composites. Moscow: Dodeka-XXI. 2004. 320 p. (rus.)
- [3] Krul, L.P. About the aggregate states of polymers. 2022. Polymer materials and technologies. 8(4). p. 5. (rus.)
- [4] Popovich, A.A. Promising materials and technologies of additive manufacturing. V. 1. New materials for additive technologies. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS. 2023. 346 p. (rus.)
- [5] Jizhao, H., Alishin, T.R. Study of deformation of metal powders in the process of quasi-isostatic pressing. 2022. Prospects for the development of fundamental sciences (Tomsk). 1. pp. 203-205. (rus.)
- [6] Deli, L. The quasi-isostatic pressing method of ceramic products. 2003. Shandong Ceramics. 26(004). pp. 24-28.

- [7] Timokhova, M. Industrial technology for the automated production of grinding balls by quasi-isostatic pressing. 2011. *Refractories and Industrial Ceramics*. 52(6). pp. 389-392.
- [8] Timokhova, M. Some features of the method of quasi-isostatic pressing of ceramic and refractory products. 2019. *New Refract.* 3. pp. 17-20.
- [9] Kuznetsov, P.A., Prostorov, A.O., Radkevich, M.M. Installation for pressing tubular products from powders. The patent of the Russian Federation 217620 U1. 2023. 10. *FSIS Official Bulletin*. (rus.)
- [10] Jonsen, P., Haggblad, H., Gustafsson, G. Modelling the non-linear elastic behavior and fracture of metal powder compacts. 2015. *Powder Technology*. 284. pp. 496-503.
- [11] Lezhnev, A., Naizabekov A., Volokitin, A., Volokitina, I., Panin, E., Knapinski, M. Development and research of combined process of equal channel angular pressing – drawing. 2017. *J. Chem. Technol. Metall.* 52. pp. 172-179.
- [12] Lipin, V.A., Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Karzina, Yu.S. Junction Adhesion Strength in a Layer of Aluminum-Carbon-Fiber Composite Material. 2024. *Fibre Chemistry*. 56. pp. 72-75.
- [13] Vinokurova, A.A., Poletaev, A.P., Kotov, S.A., Parshikov, R.A., Ganin, S.V. Investigation of Pressing and Sintering Processes of Powder Copper Samples for Equal Channel Angular Pressing. 2023. *Key Engineering Materials*. 941. pp. 129-134.
- [14] Kuznetsov, P., Kuznetsov, R., Lepetan, K. Development Prospects of Dies and Equipment for Elastostatic Pressing of Products from Powders. 2024. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 200-206.
- [15] Kuznetsov, P., Prostorova, A., Kuznetsov, R., Tretyakov, V. Technology of Bimetallic Products Forming Based on Sintered Inserts. 2022. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 180-186.