

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

А. Д. Погребняк¹, К. А. Дядюра¹, Л. В. Маликов²

¹Сумский государственный университет,

Сумы, Украина,

²Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины,

Харьков, Украина

Поступила в редакцию 24. 09. 2014

Представлены результаты экспериментальных исследований поверхностных слоев образцов из конструкционной стали после применения электролитно-плазменной обработки. Установлено влияние приложенного напряжения, продолжительности процесса и концентрации электролита на микротвердость и перенос легирующего элемента к поверхности. Результаты проведенных исследований показали целесообразность применения покрытий молибденом для повышения твердости и износостойкости.

Ключевые слова: электролитно-плазменное легирование, модификация поверхности, покрытие, износостойкость.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ

О. Д. Погребняк, К. А. Дядюра, Л. В. Маликов

Представлені результати експериментальних досліджень поверхневих шарів зразків з конструкційної сталі після застосування електролітно-плазмової обробки. Встановлено вплив прикладеної напруги, тривалості процесу та концентрації електроліту на микротвердість та перенесення легуючого елемента до поверхні. Результати проведених досліджень показали доцільність застосування покриттів молибденом для підвищення твердості і зносостійкості.

Ключові слова: електролітно-плазмове легування, модифікація поверхні, покриття, зносостійкість.

RESULTS OF INVESTIGATION OF THE SURFACES OF CONSTRUCTION STEEL AFTER ELECTROLYTIC-PLASMA PROCESSING

A. D. Pogrebnjak, K. A. Diadiura, L. V. Malikov

The results of experimental studies of the surface layers of samples of construction steel after applying electrolytic-plasma treatment have been presented. The nature of the influence of the applied voltage, duration of the process and the electrolyte concentration on the microhardness and transfer of alloying element to the surface have been determined. The results of the research showed the reasonability of applying molybdenum coatings to increase the hardness and wear resistance of machine parts.

Keywords: electrolytic-plasma alloying, modification of surface, coating, wear resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из технологических подходов к повышению износостойкости и коррозионной стойкости деталей машин и механизмов из конструкционных сталей является модификация их поверхностного слоя. Использование методов обработки концентрированными потоками энергий позволяет сформировать поверхностные слои с оптимальными физико

-механическими и функциональными свойствами [1]. Обработка металлов электролитно-плазменным методом является одной из современных и перспективных технологий, которая заменяет диффузионные процессы насыщения поверхности (цементацию, азотирование, силицирование, борирование и др.) и включают в себя оксидирование, осаждение, насыщение и т. п.

[2, 3]. В процессе обработки в электролитной плазме происходят изменения структурно-фазовых состояний и свойств материала.

Отличие электролитно-плазменных технологий (ЭПТ) от тепловых диффузионных процессов в том, что при их проведении значительно усиливаются и ускоряются физические и химические составляющие процесса диффузии и уменьшается время проведения обработки за счет плазменного электролиза. Сочетание механических, тепловых, химических и электрических методов обработки при ЭПТ создает условия для получения на поверхности изделий покрытий с кристаллической и аморфной структурой широкого функционального назначения. Их толщина составляет от нескольких микрометров до нескольких десятых долей миллиметра. Опыт использования плазменного электролиза показывает [4], что покрытия, полученные данным методом, успешно конкурируют с покрытиями, которые получены анодированием и термическим оксидированием, а также обеспечивают альтернативу другим «композиционным материалам» в разных сферах промышленности.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей изменения структуры, фазового состава и микротвердости стали 20Л в тонких поверхностных слоях вследствие физического воздействия ионов высокотемпературной плазмы и электрического разряда.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с поставленными задачами в качестве объекта исследования была выбрана конструкционная сталь 20 Л (0,17—0,25 С; 0,2—0,52 Si; 0,35—0,9 Mn; до 0,3 Ni; до 0,045 S; до 0,04 P; до 0,3 Cr; до 0,3 Cu), широко используемая, предпочтительно для изготовления деталей общего машиностроения, которые работают при температуре от –40 до 450 °С.

Обработка ЭПТ требует тщательного подбора комбинации металл — электролит [2]. В данной работе для улучшения поверхностной твердости, стойкости к износу, коррозии и усталостной прочности конструкционной стали, предложен раствор соды

концентрации 0,3 кг/л в качестве электролита для процессов плазменно-электролитического насыщения.

В зависимости от электролита, возможно композиционное насыщение неметаллическими элементами, такими как O, C, N, B (их комбинациями) или карбидоформирующими переходными металлами, как W, Mo, V и т. д. [4]. Насыщение анодных поверхностей неметаллическими элементами обычно осуществляется с помощью водных растворов простых неорганических солей, содержащих желаемые элементы и некоторые органические соединения.

Были проведены эксперименты электролитно-плазменной обработки поверхности образцов (параллелепипедов с размерами $3 \times 20 \times 30$ см³) из низкоуглеродистой стали 20Л.

Условия обработки представлены в табл. 1.

Для исследований скорость вращения — 3 об/мин. Частота оборотов — 3 об/мин.

Морфологию поверхности образцов изучали с помощью растрового электронно-сканирующего микроскопа (РЭМ). Исследования фазового состава, структуры проводились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. При съемке дифракционных спектров использовалось излучение FeK α (длина волны составляет 0,1936 нм) при фокусировке рентгеновского излучения по Брегу–Брентано θ -2 θ (2 θ — брэгговский угол). Значения тока и напряжения на рентгеновской трубке составляли 15 мА и 30 кВ. Съемка образцов проводилась в режиме непрерывной регистрации (скорость 1°/мин), диапазон углов 2 θ от 10° до 120°.

При фокусировке по Бреггу–Брентано, фокус рентгеновской трубки и приемная щель детектора расположены на окружности гониометра, в центре которой находится плоский образец. Регистрация дифракционной картины осуществляется при синхронном вращении детектора и образца вокруг оси гониометра. Угловая скорость вращения детектора преобразуется блоком детектирования в электрические импульсы, которые усиливаются и далее используются в качестве информационного сигнала для измерения

и регистрации скорости импульсов рентгеновского излучения.

несплошность, прерывистость, дискретность и неравномерная толщина.

Таблица 1

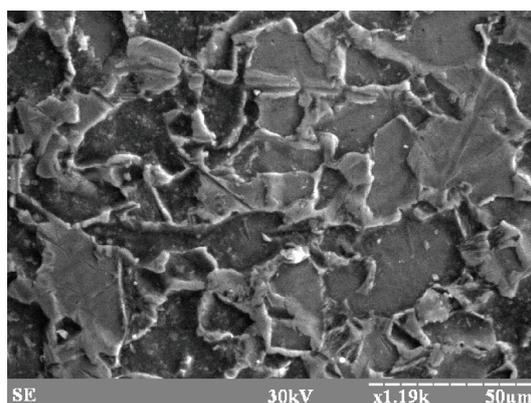
Образцы	Состав анода	Размер пятна обработки, мм	Время нагрева, мин	Напряжение, U, V	Сила тока, I, A
Образец 1	латунь	27×46	6	200—220	18—20
Образец 2	молибден			180—200	

Экспериментальные результаты передавались непосредственно в программный пакет поддержки эксперимента DifWin-1 (ТОО «Эталон ПТЦ») для предварительной обработки. Идентификация кристаллических фаз проводилась с помощью программного пакета CrystallographicaSearch-Match (Oxford Cryosystems, www.crystallographica.co.uk) при наложенных ограничениях на элементный состав образца путем автоматического сравнения полученных результатов с карточками базы данных PDF-2 с последующей ручной выборкой.

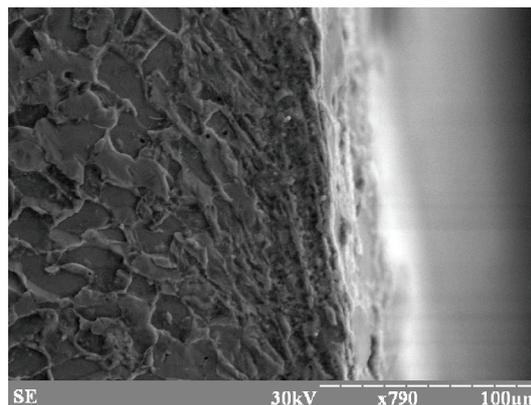
Микротвердость поверхностных слоев образцов до и после обработки измеряли методом вдавливания алмазного индентора на приборе ПМТ-3М при нагрузке 100 г и выдержке под нагрузкой 10 с. Исследование износостойкости проводили на установке для испытаний на абразивное изнашивание образцов при трении о не жестко закрепленные частицы абразива. Износостойкость испытываемого материала оценивалась путем сравнения его износа с износом эталонного образца (сталь 20Л).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

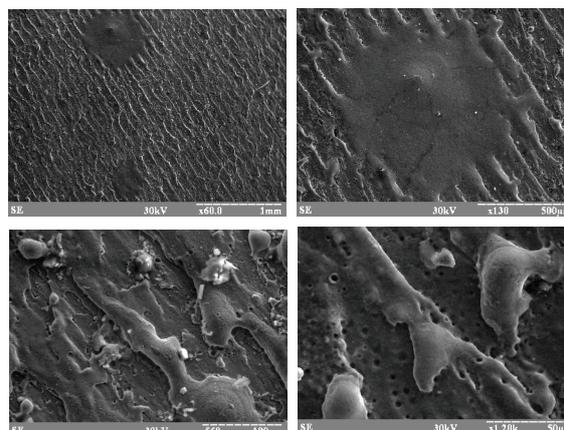
Результаты исследования структуры поверхности образца 1 (латунное покрытие) приведены на рис. 1—2. Анализ изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии, позволяет заключить, что в результате ЭПТ происходит изменение морфологии поверхности стали 20Л. На поверхности образцов были обнаружены каплеобразные частицы. На рис. 1 поверхность образца характеризуется неоднородностью (волнообразностью) при микроскопическом исследовании слоя зафиксировано его



а



б



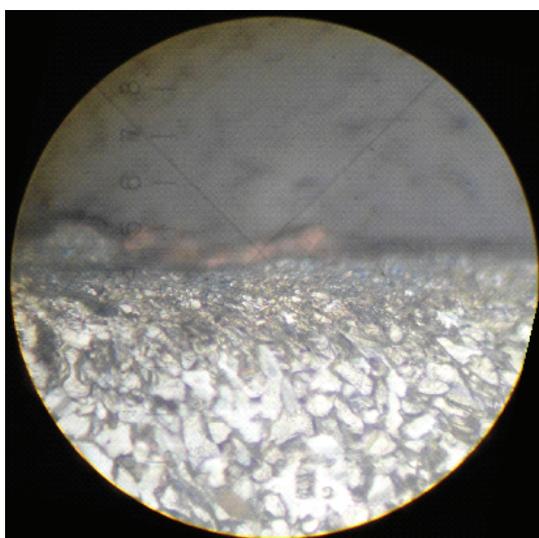
в

Рис. 1. Изображение поверхности структуры основного металла сталь 20Л с латунным покрытием, полученного с помощью растровой электронной микроскопии: а — поверхность стали 20Л; б — поперечное сечение покрытия; в — поверхность покрытия

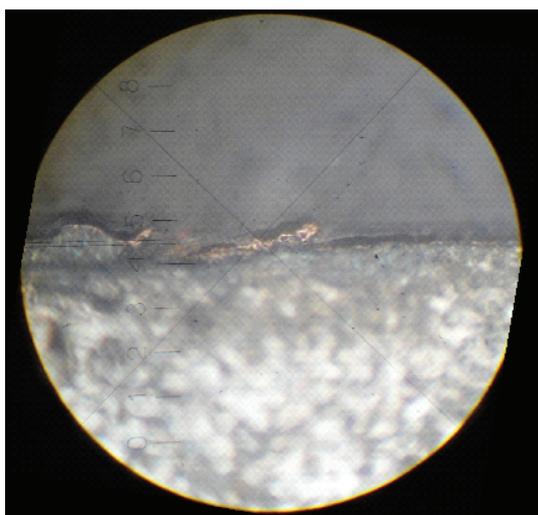
В некоторых местах слой отсутствует. Измерение микротвердости (H_{μ}) показали следующие результаты:

- поверхность (285 МПа) — зона влияния (279 МПа) — сердцевина (254 МПа);
- толщина слоя насыщения 15 мкм;
- толщина слоя с зоной влияния — 120 мкм.

По-видимому, именно с учетом того, что обработка поверхности методом ЭПТ осуществлялась при периодическом повышении и понижении плотности мощности нагрева, можно объяснить соответствующую периодичность в изменении микротвердости по глубине упрочненного слоя.



a



б

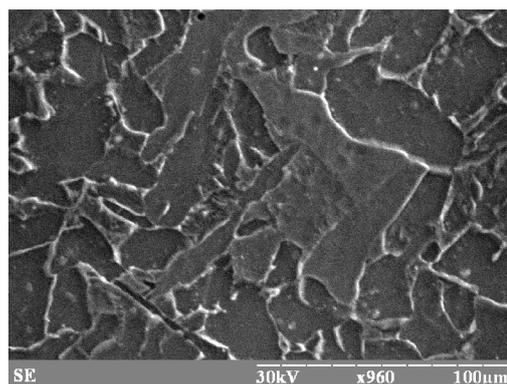
Рис. 2. Микроструктура образца поперечного сечения образца, полученная на приборе ПМТ-3 ($\times 500$)

Результаты металлографического анализа показали наличие расплавленных включений

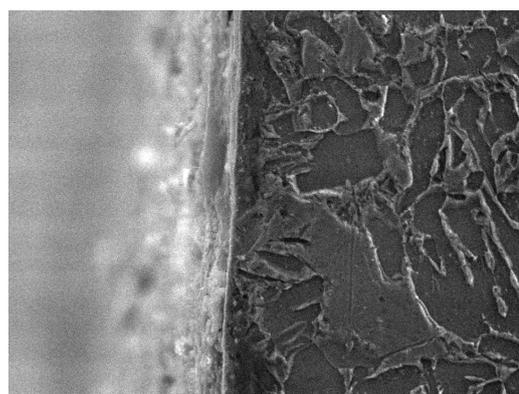
оксидов, сульфидов и силикатов на поверхности образцов из стали 20Л (рис. 1, в).

Поверхностные слои формируются в результате модификации основных электродных процессов, в основном усиленными за счет плазмы химическими реакциями и диффузионными процессами на поверхностях электрода.

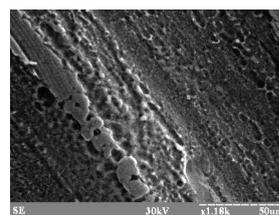
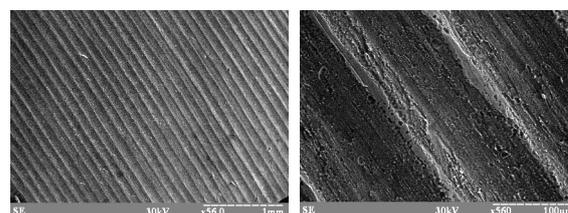
Результаты исследования структуры поверхности образца 2 (молибденовое покрытие) приведены на рис. 3—4.



a



б



в

Рис. 3. Изображение поверхности структуры основного металла сталь 20Л с молибденовым покрытием полученного с помощью растровой электронной микроскопии: *a* — поверхность стали 20Л; *б* — поперечное сечение покрытия; *в* — поверхность покрытия

Поверхность образца 2 (молибденовое покрытие) характеризуется наличием равномерного слоя высокой микротвердости — 1168 МПа и толщиной 35—40 мкм. Зона влияния — 260—265 мкм с твердостью от 681 МПа до 446 МПа. Анализ изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии, позволяет заключить, что при электролитно-плазменной обработке происходит изменение морфологии поверхности стали 20Л (рис. 3, б, в). На поверхности образцов образуется равномерный волнообразный рельеф.

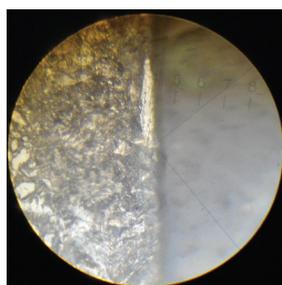
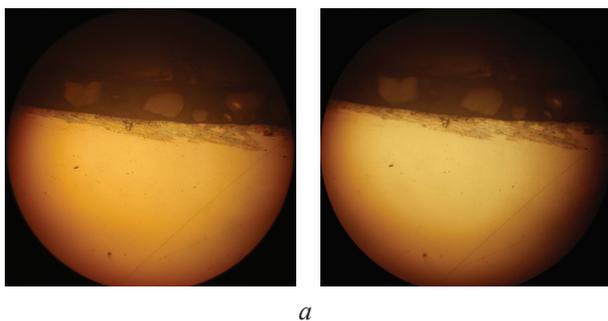


Рис. 4. Микроструктура образца поперечного сечения, полученного с помощью прибора ПМТ-3 ($\times 500$): *a* — до травления; *б* — после травления (3—4 % HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

Наноразмерные зерна (рис. 4, *a*), полученные при ЭПТ обработке (и чистке, и осаждении металлов), скорее всего, связаны с быстрым охлаждением локализованных расплавленных слоев поверхности. Следует отметить, что проведенные исследования показывают, что основная часть микроструктуры (рис. 4, *б*) и, следовательно, механические свойства обрабатываемого материала не изменяются при ЭПТ обработке.

Результаты рентгенодифракционных исследований на образце 1 (рис. 5) показали следующий фазовый состав слоя покрытия: Fe, Cu + Zn, Cu+Fe₂O₃, Cu + Fe, Fe. Пики на рис. 5 показывают качественный и

количественный состав фаз поверхности образца. Фазовый состав слоя подтвердил отсутствие фаз высокой твердости и сравнительно высокую неоднородность.

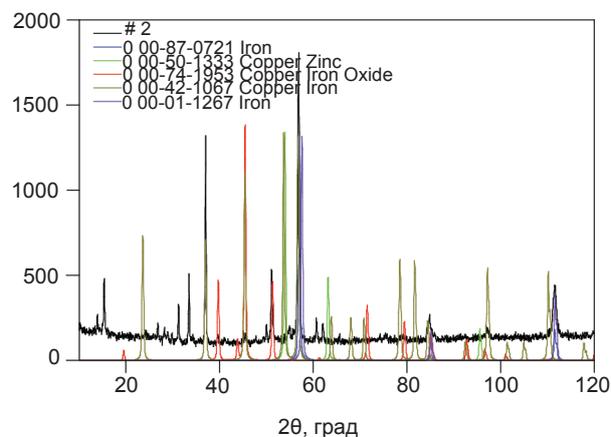


Рис. 5. Результаты рентгеновского фазового анализа покрытия латунью

Результаты рентгенодифракционных исследований на образце 1 (рис. 6) показали следующий фазовый состав слоя покрытия: MoO₂, Mo, Fe. Пики на рис. 5 показывают качественный и количественный состав фаз поверхности образца. Присутствие в слое окисла молибдена обуславливает его высокую твердость.

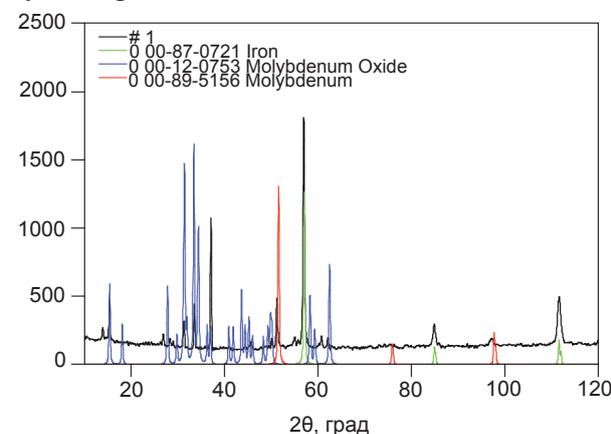


Рис. 6. Результаты рентгеновского фазового анализа покрытия молибденом

Результаты рентгеновского фазового анализа указывают на то, что качественно и количественно фазовый состав образцов является одинаковым. Незначительные расхождения в интенсивности пиков могут быть обусловлены как геометрической формой образцов, так и наличием эффекта преимущественной ориентации, т. е. текстуры.

ВЫВОДЫ

Сочетание механических, тепловых, химических и электрических методов обработки при использовании ЭПТ позволяет получать поверхность конструкционных сталей с улучшенными характеристиками, такими как коррозионная стойкость и стойкость к износу. Экспериментально установлено, что на поверхности образцов стали 20Л после обработке в электролитной плазме формируется модифицированный слой, который не является сплошным. Установлено, что в результате обработки (состав электролита - раствор концентрации соды 0,3 кг/л, состав анода — молибден) произошло значительное увеличение микротвердости в поверхностных слое стали 20Л (в 4—5 раз), что позволяет повысить триботехнические характеристики этого материала. При обработке стали в электролитной плазме большое влияние на структуру формирующегося слоя оказывает состав электролита, а время и температура в исследуемом интервале влияют, главным образом, на его толщину и микротвердость. Покрытие латунию не повышает твердости и износостойкости, но способствуют повышению коррозионной стойкости при условии получения равномерного слоя. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение области, в которой можно варьировать микроструктуру и состав этих покрытий, а также их толщину для оптимизации теплоустойкости, коррозионной и кавитационной стойкости поверхности конструкционной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баяти М. Р. Поверхностное легирование углеродистых сталей из электролитической плазмы / М. Р. Баяти, Р. Молеи, К. Жанхорбан // *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2011, № 2 (668), С. 42—45.

2. Погребняк А. Д. Электролитно-плазменная технология для нанесения покрытий и обработки металлов и сплавов / А. Д. Погребняк, А. Ш. Каверина, М. К. Кылышканов // *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2014, Т. 50, № 1, С. 1—17.
3. Куликов И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев; НАН Беларуси, Объединенный ин-т энергетических исследований — Сосны. — Минск: Беларуская навука, 2010. — 232 с.
4. Азаренков Н. А. *Материаловедение неравновесного состояния модифицированной поверхности: Монография* / Н. А. Азаренков, О. В. Соболев, А. Д. Погребняк, В. М. Береснев, С. В. Литовченко, О. Н. Иванов. — Сумы: Сумский государственный университет, 2012. — 683 с.

LITERATURA

1. Bayati M. R. Poverhnostnoe legirovanie uglerodistykh stalej iz elektroliticheskoj plazmy / M. R. Bayati, R. Molei, K. Zhanhorban // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2011, No. 2 (668), С. 42—45.
2. Pogrebnyak A. D. Elektrolitno-plazmennaya tehnologiya dlya naneseniya pokrytij i obrabotki metallov i splavov / A. D. Pogrebnyak, A. Sh. Kaverina, M. K. Kylyshkanov // *Fizikohimiya poverhnosti i zaschita materialov*, 2014, Vol. 50, No. 1, P. 1—17.
3. Kulikov I. S. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka materialov / I. S. Kulikov, S. V. Vaschenko, A. Ya. Kamenev; NAN Belarusi, Obedinennyj in-t energeticheskikh issledovaniy — Sosny. — Minsk: Belaruskaya navuka, 2010. — 232 p.
4. Azarenkov N. A. *Materialovedenie neravnovesnogo sostoyaniya modifitsirovannoj poverhnosti: Monografiya* / N. A. Azarenkov, O. V. Sobol', A. D. Pogrebnyak, V. M. Beresnev, S. V. Litovchenko, O. N. Ivanov. — Sumy: Sumskij gosudarstvennyj universitet, 2012. — 683 p.